

CELSO MARTINS JÚNIOR

ABORDAGENS HEURÍSTICAS PARA A CONSOLIDAÇÃO DE CARGAS E
ROTEAMENTO DE VEÍCULOS DE ENTREGA DOS PRODUTOS DE UMA
INDÚSTRIA DE EMBALAGENS

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Ciências, Curso de
Pós-Graduação em Métodos Numéricos em
Engenharia – Programação Matemática, Setores de
Tecnologia e Ciências Exatas, Universidade Federal
do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra. Luzia Vidal de Souza

CURITIBA
2013

M386a

Martins Junior, Celso

Abordagens heurísticas para consolidação de cargas e roteamento de veículos de entrega dos produtos de uma indústria de embalagens.

[manuscrito] / Celso Martins Junior. – Curitiba, 2013.

99f. : il. [algumas color.] ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setores de Tecnologia e Ciências Exatas, Programa de Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, 2013.

Orientadora: Luiza Vidal de Souza

1. Programação heurística. 2. Roteamento de veículos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Souza, Luiza Vidal. III. Título.

CDD: 519.72

TERMO DE APROVAÇÃO

CELSO MARTINS JÚNIOR

ABORDAGENS HEURÍSTICAS PARA A CONSOLIDAÇÃO DE CARGAS E
ROTEAMENTO DE VEÍCULOS DE ENTREGA DOS PRODUTOS DE UMA
INDÚSTRIA DE EMBALAGENS

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em
Ciências, Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia –
Programação Matemática, Setores de Tecnologia e Ciências Exatas, Universidade
Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Prof.^a Dra Luzia Vidal de Souza
Orientadora – Departamento de Expressão Gráfica, UFPR

Prof. Dr.
Departamento de _____ – UFPR

Prof. Dr.
Departamento de _____ – UFPR

Curitiba, __ de _____ de 2013.

Dedico esse trabalho à minha esposa, sem seu apoio, incentivo e compreensão, não seria possível desenvolver esse trabalho.

AGRADECIMENTOS

A professora Luzia Vidal de Souza, pelos ensinamentos e orientação.

A Universidade Federal do Paraná por oferecer o Mestrado em Métodos Numéricos e Engenharia.

A Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO por possibilitar a flexibilidade de horário conforme minhas necessidades.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo auxílio financeiro por meio de bolsa.

Aos diretores e funcionários da empresa, onde o trabalho foi realizado, que forneceram os dados necessários e dedicaram seu tempo para a completa compreensão do trabalho realizado.

A Maristela Bandil, sempre alegre e descontraída, um exemplo de pessoa, sempre pronta para ajudar no que fosse preciso.

A minha esposa Margaret, que me incentivou a cursar o mestrado, sempre me apoiou nos momentos difíceis, e suportou vários fardos, para que eu pudesse dedicar tempo ao mestrado.

Aos meus filhos Eduarda e Gustavo, que muitas vezes não compreenderam a minha ausência.

Ao amigo Fábio Horst, pelo companheirismo e apoio durante todo o mestrado.

Aos amigos Beatriz Rocha, Cleverson Fernando Salache e Danny Jessé Nascimento, pela ajuda com a correção dos textos e sugestões preciosas.

Ao amigo Leocir Bettiolo, pelos ensinamentos na área de programação, sempre estando disposto a ajudar com as dúvidas decorrentes.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein.

RESUMO

Esta pesquisa tratou da implementação de um modelo baseado na programação matemática para elaborar uma proposta de consolidação de cargas¹ e roteamento de veículos de entrega dos produtos de uma indústria de embalagens, com intuito de direcionar o Planejamento da Programação de Produção ao atendimento dessas cargas. Com isso, busca-se a redução dos custos do frete e dos atrasos de entrega, efetuando ainda, o melhor aproveitamento das capacidades das cargas dos veículos. A partir dos dados dos pedidos dos clientes e entrevistas com os responsáveis da empresa, foram detectadas as características do problema, pelas quais foram definidos os procedimentos para o modelo, direcionando-o a soluções adequadas a realidade da empresa. Para construção das rotas foram selecionadas quatro heurísticas com objetivo de verificar a mais adequada, sendo elas: Algoritmo do Vizinho Mais Próximo, *GRASP*, *Savings* de *Clarke* e *Wright* com parâmetro modelar e Heurística de *Mole* e *Jameson*. Foram efetuados diversos experimentos buscando explorar o universo de soluções geradas por elas, a partir dos parâmetros das formulações. Também foram efetuados experimentos quanto à forma de utilização do veículo de menor capacidade e de alguns procedimentos definidos a algumas das heurísticas. Foram aplicados métodos de melhoria das soluções, que se mostraram eficientes em todos os experimentos. Obteve-se ótimos resultados com as heurísticas, que apresentaram soluções com redução dos custos do frete e dos atrasos de entrega, demonstrando que a abordagem através modelagem matemática do problema, foi bem dimensionada às necessidades da empresa.

Palavras Chave: Roteamento de Veículos, Heurísticas, Programação de Produção.

1 A consolidação de cargas consiste em criar carregamentos, a partir de várias demandas, a fim de obter economia no custo dos fretes e aumentar o nível do serviço ao cliente.

ABSTRACT

This research dealt with the implementation of a model based on mathematical programming to develop a proposal for consolidation of cargo and vehicle routing of delivery of a packaging industry, in order to direct the planning Production scheduling to meet these loads. Thus, it seeks to reduce freight costs and delivery delays, effecting yet, the best use of the capabilities of the loads of vehicles. From the data of customer orders and interviews with company officials, were detected characteristics of the problem, for which the procedures were defined for the model, directing them to appropriate solutions to business reality. For construction of the routes have been selected four heuristics in order to verify the most appropriate, namely: the Nearest Neighbor algorithm, GRASP, Clarke and Wright Savings with parameter modeling and heuristics Mole and Jameson. Several experiments were performed to explore the universe looking for solutions generated by them, from the parameters of the formulations. Were also carried out experiments on how to use the vehicle of lesser ability and some procedures defined some heuristics. Methods were applied to improve the solutions, which were effective in all experiments. We obtained excellent results with the heuristic, presenting solutions to reduce freight costs and delivery delays, demonstrating that the approach through mathematical modeling of the problem was well sized business needs.

Keywords: Vehicle Routing, Heuristics, Production Schedule.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	CICLO HAMILTONIANO	24
FIGURA 2 -	EXEMPLO DE PRV COM QUATRO VEÍCULOS.....	25
FIGURA 3 -	ESTRUTURA DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	31
FIGURA 4 -	EMBALAGENS BIG BAG.....	32
FIGURA 5 -	EMBALAGENS DE RÁFIA COM IMPRESSÃO	32
FIGURA 6 -	DE RÁFIA EM FORMA DE BOBINA.....	33
FIGURA 7 -	ILUSTRAÇÃO DA APLICAÇÃO DO ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO	39
FIGURA 8 -	CORREÇÃO NA FORMAÇÃO DA ROTA.....	41
FIGURA 9 -	ROTAS ENTRE O DEPÓSITO E OS CLIENTES I E J.	44
FIGURA 10 -	ROTA RESULTADO	44
FIGURA 11 -	ILUSTRAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO ALGORITMO DE CKARKE E <i>WRIGHT</i>	46
FIGURA 12 -	COMBINAÇÃO DAS ROTAS ATRAVÉS DA METODOLOGIA DA HEURÍSTICA DE <i>CLARKE</i> E <i>WRIGHT</i> ADAPTADA AO PROBLEMA	49
FIGURA 13 -	ROTA CONSTRUÍDA PELO ALGORITMO DE <i>CLARKE</i> E <i>WRIGHT</i>	50
FIGURA 14 -	ILUSTRAÇÃO DA CONSTRUÇÃO DAS ROTAS UTILIZANDO O ALGORITMO DE <i>MOLE</i> E <i>JAMESON</i>	53
FIGURA 15 -	ILUSTRAÇÃO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE BUSCA LOCAL MUDAR ATENDIMENTO DA CIDADE DE DEMANDA	58
FIGURA 16 -	ILUSTRAÇÃO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE BUSCA LOCAL MUDAR ATENDIMENTO DA CIDADE DE DEMANDA	58
FIGURA 17 -	ILUSTRAÇÃO DA APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE BUSCA LOCAL TROCAR ATENDIMENTOS COM INVERSÃO	59
FIGURA 18 -	ROTAS FORMADAS PELO ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO, COMPARANDO A APLICAÇÃO DOS ALGORITMOS DE MELHORIA NA SOLUÇÃO PARCIAL.	66
FIGURA 19 -	ROTAS FORMADAS PELO ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO.	69
FIGURA 20 -	ROTAS FORMADAS PELA HEURÍSTICA <i>GRASP</i>	72

FIGURA 21 - ROTAS FORMADAS PELA HEURÍSTICA DE CLARKE E
WRIGHT.....77

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS POR HEINEN (2005).....	54
TABELA 2 -	DADOS GERAIS DAS ENTREGAS EFETUADAS PELA EMPRESA.....	63
TABELA 3 -	PERCENTUAIS DE REDUÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DOS ALGORITMOS DE MELHORIA E PROCEDIMENTO	64
TABELA 4 -	PERCENTUAIS DE REDUÇÃO NO VALOR DO FRETE COM A UTILIZAÇÃO DOS ALGORITMOS DE MELHORIA NAS SOLUÇÕES DA HEURÍSTICA DE <i>CLARKE</i> E <i>WRIGHT</i>	65
TABELA 5 -	PERCENTUAL DE REDUÇÃO NOS CUSTOS DO FRETE COM UTILIZAÇÃO DO FURGÃO NA FORMA SEMANAL EM RELAÇÃO ÀS DEMAIS FORMAS.	67
TABELA 6 -	RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DO ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO	67
TABELA 7 -	DIAS DE ATRASOS DE ENTREGA NOS PEDIDOS NA SOLUÇÃO DO ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO	68
TABELA 8 -	RESULTADOS DO VALOR DO FRETE DAS SOLUÇÕES GERADAS PELA HEURÍSTICA <i>GRASP</i>	70
TABELA 9 -	RESULTADOS DAS QUANTIDADES DE DIAS DE ATRASOS DE ENTREGA DAS SOLUÇÕES GERADAS PELA HEURÍSTICA <i>GRASP</i>	70
TABELA 10 -	QUANTIDADE DE DIAS ATRASOS DE ENTREGA NOS PEDIDOS, MELHORES SOLUÇÕES DO <i>GRASP</i>	71
TABELA 11 -	TEMPO DE EXECUÇÃO DA HEURÍSTICA <i>GRASP</i>	72
TABELA 12 -	RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DA HEURÍSTICA DE <i>CLARKE</i> E <i>WRIGHT</i>	73
TABELA 13 -	DISTRIBUIÇÃO DOS ATRASOS DE ENTREGA DAS SOLUÇÕES DA HEURÍSTICA DE <i>CLARKE</i> E <i>WRIGHT</i>	76
TABELA 14 -	RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DA HEURÍSTICA DE <i>MOLE</i> E <i>JAMESON</i>	78
TABELA 15 -	ATRASOS DE ENTREGA NOS PEDIDOS DAS SOLUÇÕES DE <i>MOLE</i> E <i>JAMESON</i>	80
TABELA 16 -	MELHOR RESULTADO DA HEURÍSTICA DE <i>MOLE</i> E <i>JAMESON</i>	80
TABELA 17 -	SÍNTESE DOS RESULTADOS	81

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO	40
QUADRO 2 - PSEUDOCÓDIGO DA HEURÍSTICA <i>GRASP</i> PARA PRV	42
QUADRO 3 - PSEUDOCÓDIGO DA HEURÍSTICA DE <i>CLARKE</i> E <i>WRIGHT</i>	47
QUADRO 4 - PSEUDOCÓDIGO DA HEURÍSTICA DE <i>MOLE</i> E <i>JAMESON</i>	54
QUADRO 5 - PSEUDOCÓDIGO PARA A CONSOLIDAÇÃO DA CARGA E ROTEAMENTO DO VEÍCULO.....	62

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - RESULTADOS DO VALOR DO FRETE DAS SOLUÇÕES GERADAS PELA HEURÍSTICA DE <i>CLARKE</i> E <i>WRIGHT</i>	74
GRÁFICO 2 - RESULTADOS DAS QUANTIDADES DE DIAS DE ATRASOS DE ENTREGA DAS SOLUÇÕES GERADAS PELA HEURÍSTICA DE <i>CLARKE</i> E <i>WRIGHT</i>	74
GRÁFICO 3 - RESULTADOS DO VALOR DO FRETE DAS SOLUÇÕES DA HEURÍSTICA DE <i>MOLE</i> E <i>JAMESON</i>	79
GRÁFICO 4 - QUANTIDADE DE DIAS DE ATRASOS DE ENTREGA DAS SOLUÇÕES DA HEURÍSTICA DE <i>MOLE</i> E <i>JAMESON</i>	79

LISTA DE SIGLAS

ACO	- <i>Ant Colony Optimization</i>
GRASP	- <i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
ORE	- Oportunidade Real de Economia
PCP	- Programação e Controle de Produção
PCV	- Problema do Caixeiro Viajante
PRV	- Problema de Roteamento de Veículos
RCL	- <i>Restricted Candidate List</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	19
1.1.1 OBJETIVO GERAL	19
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.2 JUSTIFICATIVA	19
1.3 ESTRUTURA	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 TRABALHOS RELACIONADOS À PESQUISA	22
2.2 PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE	24
2.3 PROBLEMAS DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS	25
2.4 MÉTODOS DE SOLUÇÃO DO PRV	26
2.5 SOLUÇÕES EXATAS	26
2.6 HEURÍSTICAS E META-HEURÍSTICAS	27
3. MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1 A EMPRESA, PRODUTOS E METODOLOGIA DE TRABALHO ATUAL	32
3.2 O PROBLEMA E ESPECIFICIDADES	34
3.3 HEURÍSTICAS SELECIONADAS	38
3.3.1 ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO	39
3.3.1.1. Critério de aceitação da cidade na rota	40
3.3.2 GRASP	41
3.3.2.1. Implementação e parâmetros	43
3.3.3 HEURÍSTICA DOS SAVINGS DE CLARKE E WRIGHT	43
3.3.3.1. Adaptação da fórmula de economias e definição dos experimentos	48
3.3.4 ALGORITMO DE MOLE E JAMESON	51
3.3.4.1. Definição dos experimentos	55
3.3.5 ALGORITMOS DE MELHORIA	55
3.4 PROCEDIMENTOS	59
3.5 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	61
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
4.1 ANÁLISES INICIAIS	63
4.1.1 Análise dos algoritmos de melhoria e procedimentos definidos às heurísticas	64

4.1.2 Avaliação das formas de utilização do furgão	66
4.2 RESULTADOS COM A UTILIZAÇÃO DO ALGORITMO VIZINHO MAIS PRÓXIMO	67
4.3 RESULTADOS COM A UTILIZAÇÃO DA HEURÍSTICA <i>GRASP</i>	69
4.4 RESULTADOS COM A UTILIZAÇÃO DA HEURÍSTICA DE <i>CLARKE</i> E <i>WRIGHT</i>	73
4.5 RESULTADOS COM UTILIZAÇÃO DA HEURÍSTICA DE <i>MOLE</i> E <i>JAMESON</i>	77
4.6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	81
5 CONCLUSÃO	83
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
REFERÊNCIAS	87
APÊNDICES	91
ANEXOS	92

1. INTRODUÇÃO

O planejamento da produção desempenha papel estratégico na organização de uma indústria, sendo responsável não apenas pelo cumprimento total da produção planejada, como também pelo aproveitamento dos recursos e ordenação dos materiais a serem produzidos, buscando atender ao cliente no menor prazo possível, e, em alguns casos, considerando as formas de entrega dos produtos solicitados, de modo que os custos sejam reduzidos. Nesse sentido, Tubino (2000) afirma que o planejamento estratégico consiste em apresentar uma proposta que chegue aos melhores resultados das operações e minimize os riscos das tomadas de decisão, uma vez que essas decisões podem afetar a empresa em longo prazo.

Porém, é comum que ao abordar o Planejamento de Produção, as empresas considerem apenas a otimização dos diversos setores da linha de produção, deixando de lado pontos importantes que podem influenciar diretamente no custo final dos produtos, ou ainda, na melhor forma de atendimento aos clientes, como no caso das indústrias que efetuam a entrega dos produtos diretamente a seus clientes.

Nesses casos, o planejamento deve ser ampliado, considerando não somente a máxima produtividade, mas como e quando cada cliente deve ser atendido a fim de assegurá-lo quanto aos prazos de entrega, bem como melhor aproveitamento dos recursos de logística para remessa dos produtos. De acordo com Giacon e Mesquita (2011), são criados diversos conflitos para o planejamento da programação de produção ao serem fixados múltiplos objetivos, referindo-se aos objetivos resumidos por Hopp e Spearman (2000), como a entrega dos produtos no prazo, maximização da produção, aumento da velocidade de fluxo e minimização da ociosidade dos recursos.

Sob essa perspectiva, a Pesquisa Operacional mostra-se como uma importante ferramenta na elaboração de uma proposta de planejamento mais eficaz, caracterizada como um método científico de tomadas de decisão que consiste em um sistema organizado, com o auxílio de um modelo que por meio de sua experimentação busca a melhor maneira de operar um sistema (MEDEIROS *et al.*, 1998). Em consonância ao autor citado, Andrade (2004) menciona a “experimentação” como uma forma de fazer com que a tomada de decisão possa ser melhor avaliada antes de efetivamente implementada pela empresa.

Os modelos matemáticos têm sido amplamente utilizados na otimização de técnicas operacionais, nos mais diferentes campos, por apresentarem melhores propostas ao planejamento dos trabalhos a serem executados. Segundo Goldberg e Luna (2005) os modelos são representações simplificadas da realidade que preservam para determinadas situações e enfoques, uma equivalência adequada.

O Problema de Roteamento de Veículos (PRV) é uma das linhas mais abordadas na Pesquisa Operacional, sendo tomado como objeto de estudo em vários trabalhos, apresentando formas de resolução diferenciadas (RODRIGUES, 2007). Outra questão para o grande número de abordagens sobre o tema são as características apresentadas em cada situação, uma vez que nos problemas reais, há uma grande diversidade de restrições e formas de trabalho, que torna impossível a obtenção de soluções ótimas às instâncias envolvidas. Desse modo, traz o desafio da busca de novos procedimentos, através da implementação de técnicas diferenciadas a fim de se obterem resultados mais eficientes para cada caso, o que envolve grande complexidade matemática (CUNHA, 2000).

Nesse contexto, está localizado o estudo abordado nesta dissertação, tratando-se da resolução de um problema real, para o qual foi elaborada uma proposta de consolidação das cargas e de roteamento dos veículos de entrega dos produtos de uma indústria do ramo de embalagens, com objetivo de orientar o Planejamento da Programação de Produção, que poderá considerar esses critérios, além dos já estabelecidos para a otimização do sistema produtivo.

Para apresentar uma proposta eficiente, desenvolveu-se um método utilizando programação computacional, que através da modelagem matemática do problema e utilização de procedimentos baseados nas necessidades da empresa, efetua a consolidação das cargas e o roteamento dos veículos, utilizando heurísticas de construção de rotas e de melhoria das soluções. As heurísticas utilizadas sofreram algumas adaptações durante suas implementações e foram testadas quanto aos seus parâmetros, a fim de monitorar os resultados e verificar as soluções que apresentassem melhorias eficazes em relação ao trabalho desenvolvido pela empresa.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar uma proposta de consolidação das cargas e de roteamento dos veículos de entrega, que venha a redirecionar o Planejamento da Programação de Produção de uma indústria de embalagens, com o intuito de reduzir os custos do frete para entrega dos produtos e os atrasos de entrega aos clientes.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Efetuar a modelagem matemática do problema;
- Testar as heurísticas selecionadas;
- Escolher as alternativas que apresentam o melhor resultado para o experimento;
- Planejar e orientar a Programação da Produção para a formação das cargas;
- Propor ações que reduzam os níveis de estoques dos produtos acabados.

1.2 JUSTIFICATIVA

O planejamento eficiente é uma estratégia necessária para o fortalecimento da empresa frente a um mercado competitivo, no qual se deve zelar pela qualidade dos produtos comercializados, redução de custos e excelente atendimento aos clientes.

O mercado de fibras poliolefínicas² onde a empresa deste estudo de caso está inserida, é caracterizado pela instabilidade dos custos da matéria-prima, derivados de petróleo, que são comercializados por um único fornecedor. Vívolo (2013) destaca outras dificuldades que afetam as indústrias desse ramo, como a expansão da abrangência de empresas de outros países no mercado global, que já estão competindo pelo mercado nacional.

Frente a essas dificuldades, a fim de se manterem no mercado, as empresas procuram ampliar sua gama de produtos, bem como a melhoria da qualidade dos serviços prestados. Para isso, realizam investimentos em equipamentos de primeira linha e em qualificação de pessoal, apesar desses esforços nem sempre esses investimentos são suficientes para atingir os objetivos esperados, conforme salienta Carvalho:

...em sistemas produtivos cuja complexidade vai crescendo com o aumento da procura, compra de novos equipamentos e aumento da variedade dos produtos, é comum que o sistema de PPC (Planejamento, Programação e Controle) não consiga acompanhar a evolução, reduzindo o seu desempenho para níveis abaixo do sustentável, podendo muitas vezes por em causa a viabilidade da empresa (2000, p.19).

Dessa forma, com a ampliação do mercado, elevando a variedade de produtos a serem industrializados, um planejamento de produção que não é realizado considerando todos os aspectos que influenciam nos custos dos produtos e na qualidade do atendimento aos clientes, torna-se falho. Segundo Lachtermacher (2004), esse planejamento torna-se impossível de ser elaborado apenas com a intuição gerencial, devido ao grande número de alternativas conflitantes e concorrentes. O mesmo autor ainda explica que, no mercado atual, há a necessidade de conciliar o conhecimento gerencial daqueles que tomam a decisão, que possuem larga experiência no mercado e a implementação de modelos matemáticos que podem efetuar diversas simulações e, então, apresentar informações gerenciais adequadas, a fim de que a decisão seja a mais acertada.

Nesse sentido, a implementação de um método científico, baseado na modelagem matemática, que apresente uma proposta de consolidação de cargas e de roteamento dos veículos, que vise proporcionar a redução nos custos de entregas e o atendimento aos clientes dentro do prazo estipulado, pode trazer

2 Fibras Poliofínicas também são conhecidas com ráfia de polipropileno, que são as fitas desse material, utilizadas para tecer tecidos para fabricação utilizados nas embalagens.

benefícios à empresa, ampliando a qualidade dos serviços e oferecendo produtos com valores reduzidos, aumentando sua competitividade no mercado.

1.3 ESTRUTURA

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, sendo a introdução, com os objetivos e a justificativa do trabalho apresentados no primeiro capítulo.

No segundo capítulo, é abordada a revisão bibliográfica, onde são apresentados alguns trabalhos voltados à pesquisa. Também são tratados os conceitos gerais relacionados ao roteamento de veículos e às formas de resolução do problema

O capítulo três, denominado materiais e métodos, apresenta os procedimentos necessários ao desenvolvimento da pesquisa, trazendo informações da empresa, metodologia de trabalho atual e as restrições que foram consideradas na resolução do problema e como foram modelados. Na sequência, dentro do mesmo capítulo, é abordada a estrutura e parametrização do método implementado. Posteriormente, são descritas as heurísticas utilizadas para a resolução do problema e as adaptações efetuadas para se adequarem as características do problema e definidos os parâmetros para suas experimentações. No quarto capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados em cada uma das propostas, sob os quais foram analisados os custos do frete e as quantidades de dias de atrasos de entrega, sendo ainda, comparados aos dados da empresa e os tempos de execução para construção das soluções. Então, são comparadas as melhores soluções geradas pelas heurísticas.

Finalmente, no último capítulo, é apresentada a conclusão e considerações oriundas desse estudo, com os resultados encontrados a partir das pesquisas e análises que foram realizadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os trabalhos encontrados na literatura, relacionados ao tema da presente dissertação e as principais metodologias utilizadas para a resolução dos problemas. Em seguida serão abordados os conceitos gerais relacionados ao Problema de Roteamento de Veículos e os métodos existentes para sua resolução.

2.1 TRABALHOS RELACIONADOS À PESQUISA

Muitos dos trabalhos relacionados à Pesquisa Operacional, em especial ao Roteamento de Veículos, se baseiam no desenvolvimento de modelos matemáticos e de sistemas de programação aliados às heurísticas, que vem sendo sofrendo diversas modificações para se adequarem aos problemas abordados, já que cada vez mais são introduzidos novos critérios e exigências relacionados a cada situação.

Rodrigues (2007) utilizou heurísticas e meta-heurísticas num problema de otimização combinatória para construção de rotas dos veículos que efetuam o transporte de funcionários da empresa Itaipu Binacional, no qual apresentou bom resultado com a utilização da meta-heurística *Ant Colony Optimization* (ACO) aplicado ao Problema do Caixeiro Viajante (PCV), com a redução da quilometragem total percorrida e de um veículo.

Fernandes (2005) aborda a Meta-heurística *GRASP*, a fim de minimizar a média ponderada do tempo de espera dos caminhões carregados com frangos destinados ao abate, através do roteamento dos caminhões até as granjas. A pesquisa revisou a programação dos horários, de modo a satisfazer a demanda de abate e diminuir o tempo de espera.

Quintieri (2005) utilizou o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo, *Savings* de *Clarke* e *Wright* e duas propostas para o *GRASP* combinado às duas primeiras heurísticas. Ainda propôs alguns métodos de busca local para melhoria das rotas geradas pelas heurísticas sob um conjunto de instâncias criado a partir dos

problemas reais de uma empresa de transportes. As soluções foram comparadas às rotas estabelecidas em pacotes comerciais, apresentando melhorias significativas.

Heinen e Osório (2006) efetuaram comparações entre os algoritmos de *Clarke e Wright*, *Mole* e *Jameson* e Algoritmos Genéticos, com o objetivo de avaliar seus desempenhos, aplicando-os a situações problema com restrições de combustível, capacidade dos veículos e tempo para percorrer as rotas. O Algoritmo de *Mole* e *Jameson* apresentou custos menores do que o de *Clarke e Wright* (1964), porém, seu tempo de execução aumentou significativamente à medida que aumentava o número de pontos. O Algoritmo Genético mostrou-se mais eficaz apenas para as menores instâncias, mas com tempo de execução superior aos demais algoritmos.

No trabalho desenvolvido por Queiroz (2012), são considerados: frota heterogênea, entregas fracionadas e janelas de tempo para o atendimento onde foram implementados quatro algoritmos propostos por Golden *et al.* (1984) baseados na Heurística de *Clarke e Wright* (1964), sendo um deles denominado Oportunidade Real de Economia com parâmetro modelador ($ORE\lambda$), atingindo bons resultados, de acordo com as características de cada situação e com excelente taxa de ocupação dos veículos.

Campos e Yoshizaki (2006) propõem a utilização de meta-heurísticas para apresentar uma proposta mais econômica para roteirização de veículos com frota heterogênea, janelas de tempo e entregas fracionadas de um Centro de Distribuição. Os testes foram realizados utilizando a Heurística de *Clarke e Wright* em sua forma original, e através de um método alternativo, adicionando aleatoriedade à heurística, resultando em boas soluções.

Zamboni (1997) apresentou uma solução para o problema de roteamento do transporte escolar, com a utilização de Programação Linear Inteira, a Heurística de *Clarke e Wright* e o Algoritmo de Inserção Mais Econômica, resultando na minimização da distância total percorrida pela frota, reduzindo assim, a permanência dos alunos nos ônibus escolares.

2.2 PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) é um dos problemas mais importantes e mais estudados na pesquisa operacional, sendo popular principalmente pela sua larga aplicabilidade, relação com outros modelos e também devido à dificuldade de encontrar soluções exatas (GOLDBARG; LUNA, 2005).

O problema consiste em determinar um ciclo sobre uma série de nós, partindo de um deles, passando em cada um dos demais nós uma única vez, e, retornando à origem, de modo que a distância total percorrida seja mínima. Segundo Cunha (2002), a origem do PCV é creditada a William Rowan Hamilton (1805-1865), que inventou um jogo sobre um dodecaedro em que cada vértice representava uma cidade cujo objetivo era formar um ciclo, saindo de uma determinada cidade, passando uma única vez sobre as demais até voltar à cidade de origem. Por essa razão, os roteiros com essas características, são chamados de Ciclos Hamiltonianos. A FIGURA 1(a) representa o ciclo hamiltoniano e a FIGURA 1(b) uma de suas possíveis soluções.

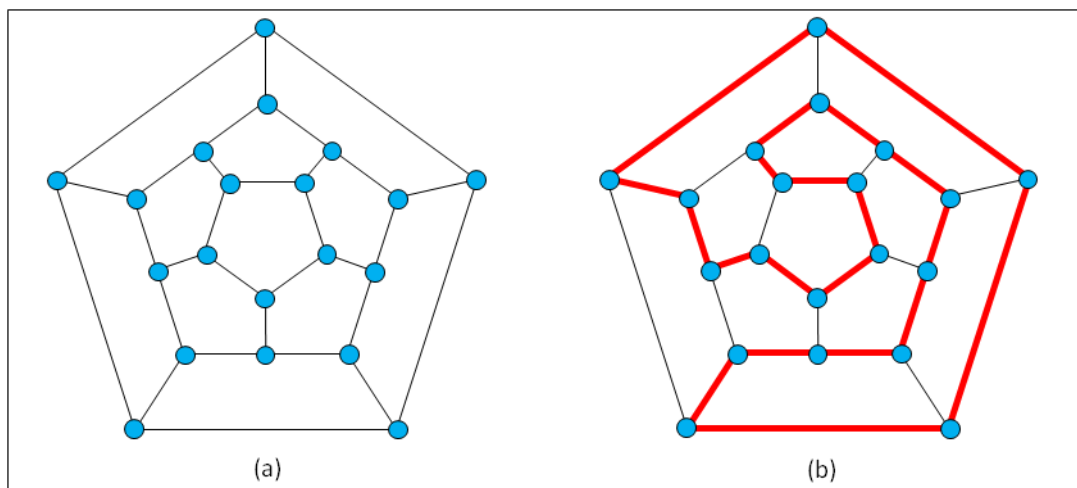


FIGURA 1 - CICLO HAMILTONIANO
FONTE: O autor (2013).

2.3 PROBLEMAS DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS

O roteamento de veículos pode ser descrito como “o atendimento de demandas localizadas nos arcos ou nos vértices de alguma rede de transportes” (GOLDBARG; LUNA, 2005). Seu objetivo é estabelecer ligações para o atendimento das demandas que podem se apresentar como prestação de serviços, como a entrega ou a coleta de mercadorias e/ou pessoas. No caso de entrega de mercadorias, deve ser formado um ciclo no qual o veículo inicia o trajeto no depósito, passa uma única vez por todos os pontos de demanda e retorna ao depósito. As funções objetivo podem visar a minimização da quantidade de veículos, distância percorrida ou tempo de tráfego.

A resolução dos Problemas de Roteamento de Veículos consiste em resolver um PCV para o trajeto de cada um dos veículos, escolhendo quais clientes serão designados para cada veículo, objetivando desse modo, o custo mínimo e a máxima eficiência (CUNHA, 2000). A FIGURA 2 ilustra a resolução de um PRV com quatro veículos.

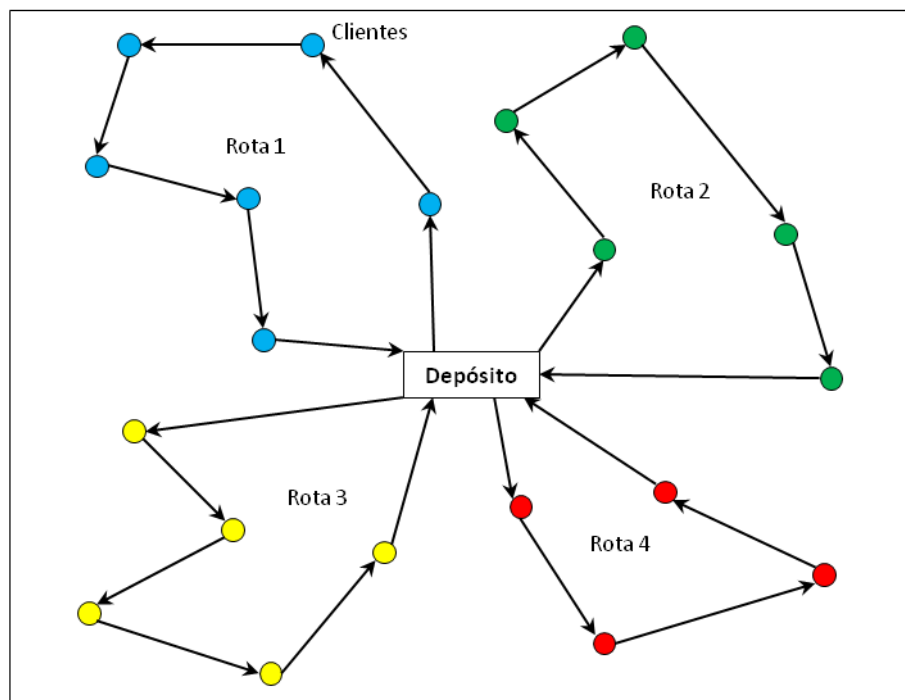


FIGURA 2 - EXEMPLO DE PRV COM QUATRO VEÍCULOS
FONTE: O autor (2013).

A resolução do PRV tem grande aplicabilidade em situações reais e com isso, tem sido constantemente abordado em trabalhos científicos, uma vez que existem diversas variações em função dos parâmetros e restrições que devem ser consideradas em cada caso, tais como:

- Número de depósitos;
- Número de veículos;
- Tipo da frota, homogênea ou heterogênea;
- Capacidade dos veículos;
- Quantidade mínima a ser despachada;
- Número mínimo ou máximo de pontos em cada rota;
- Janela de tempo, período em que o ponto de demanda deve ser atendido;
- Forma de atendimento a cada ponto de demanda.

2.4 MÉTODOS DE SOLUÇÃO DO PRV

Da mesma forma que há um conjunto cada vez maior de problemas relacionados ao roteamento de veículos, existem também diversas abordagens para sua solução. São métodos que podem ser classificados como Exatos, Heurísticos ou Meta-heurísticos. Esses algoritmos podem ser utilizados para resolver diversas formas de variação do problema ou problemas específicos, alternando ainda o tipo de atendimento das demandas, tempo de execução, forma e qualidade dos resultados.

2.5 SOLUÇÕES EXATAS

Ao analisar problemas combinatórios tal como o roteamento de veículos, a primeira opção seria analisar todas as possíveis soluções em busca da melhor delas, ou seja, o resultado ótimo. Contudo, em problemas como esses, as

possibilidades de solução aumentam exponencialmente em relação ao tamanho (número de pontos de demanda), tornando esta abordagem impraticável.

A fim de contornar o fato, existem métodos que podem encontrar a melhor solução ou demonstrar que essa solução não existe em tempo computacional finito, denominados Algoritmos Exatos (DUMITRESCU E STUTZLE, 2003). Murty (1985) define os métodos de soluções exatas como algoritmos constituídos de forma a encontrarem, dentro de um problema com infinitas soluções factíveis e sujeitas a um conjunto de restrições, respostas que sejam um máximo ou um mínimo entre todas as soluções também chamadas de ótimo global.

Entretanto, o trabalho para encontrar a solução ótima dentro de um universo com diversas soluções não é simples, pois apresenta dificuldades que devem ser vencidas, como evitar o teste de todas as soluções possíveis com intuito otimizar o sistema, conforme descrevem Goldberg e Luna (2005). Ao se tentar solucionar problemas reais que apresentam enorme variedade de soluções, os algoritmos exatos tornam-se muitas vezes, inviáveis e apresentam algumas desvantagens, tais como modelagem muito complexa e alto tempo de execução, não sendo possível analisar todas as possibilidades de soluções em tempo computacional satisfatório, mesmo com o avanço tecnológico em relação ao poder da informatização atual.

2.6 HEURÍSTICAS E META-HEURÍSTICAS

As heurísticas ou métodos heurísticos podem ser descritos como técnicas ou conjunto de métodos que objetivam determinar soluções aproximadas de problemas com elevado nível de complexidade em tempo de execução computacional adequado.

Existem vários métodos heurísticos para a resolução dos problemas de roteamento de veículos que apresentam características mais flexíveis, havendo dessa forma, a possibilidade de modelar o problema real com maior precisão. De acordo com Reeves (1993), esses métodos são ainda mais aptos por operarem a partir de funções objetivo e restrições mais complexas, o que resulta em soluções muito próximas das ótimas ou mesmo ótimas.

Dentro das heurísticas, Bodin (1983) destaca três grandes classes de procedimentos para resolver o problema de roteamento de veículos, sendo elas:

- Procedimentos de construção de rotas, que consistem em construir a rota a partir do depósito e os pontos de demanda;
- Procedimentos de melhorias ou refinamento, que alteram a rota já construída com intuito de melhorar o resultado final;
- Procedimentos compostos, que constroem uma rota inicial através dos procedimentos de construção e utilizam melhorias para obter um resultado mais eficiente.

As heurísticas construtivas são técnicas que formam uma solução de forma incremental, acrescentando um novo ponto de demanda a cada iteração, conforme a função de avaliação utilizada até gerar um ciclo sobre o conjunto de pontos. Uma das formas de escolha é a chamada gulosa, em que o elemento melhor classificado, segundo a função de avaliação do algoritmo, será o selecionado para ser acrescentando à solução. Existe ainda, o método construtivo que por meio da escolha aleatória, a cada iteração são selecionados elementos ao acaso até formar a solução completa, porém, é comum apresentarem soluções piores do que as soluções gulosas (STUTZLE; DORIGO, 2000).

Os procedimentos Heurísticos geram soluções com rotas viáveis a um custo computacional razoável, mas não há garantia que atinjam a solução ótima ou próxima dela. Para obter soluções melhores utilizam-se os procedimentos de melhoria ou Heurísticas de Melhoramento de Rotas, buscando refinar uma solução inicialmente encontrada. Esses procedimentos consistem em aplicar técnicas que alteraram a solução, para então definir as soluções finais com resultados mais próximos ao objetivo, através de modificações na ordem de visitas aos pontos de demanda que compõem a rota como inclusão, exclusão ou troca de pontos de demanda, entre outros.

Ainda, com objetivo de encontrar soluções aproximadas, destacam-se as técnicas meta-heurísticas, que são procedimentos destinados a estabelecer soluções aproximadas de boa qualidade ou até mesmo ótimas. Esses procedimentos consistem na aplicação de uma heurística subordinada que pode ser modelada para cada problema, caracterizando-se por fugir de ótimos locais direcionando as soluções próximas do ótimo global, que por serem mais genéricas podem ser aplicadas a uma variedade maior de problemas.

A utilização de métodos que buscam soluções aproximadas, além de se destacarem pelo menor tempo de execução, abrem a possibilidade de encontrar resultados mais apropriados, uma vez que são facilmente implementados e adaptados para atenderem às especificidades e restrições de um problema.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, será abordado o referencial da pesquisa desenvolvida, através da apresentação das informações da empresa, dos produtos comercializados, da forma de trabalho atual, bem como as restrições e parâmetros para consolidação das cargas. Por motivo de sigilo industrial, foram efetuadas algumas codificações ou supressões quanto aos dados que possam levar à identificação tanto da empresa, que será denominada como “Empresa”, como de seus clientes, porém, sem alterar os dados que envolvam a aplicação correta dos métodos.

Também são definidos os procedimentos para o método implementado, baseados nas especificidades do problema e as heurísticas utilizadas para efetuar os experimentos, tanto para a fase de construção das rotas como de melhoria.

Em seguida é apresentada a metodologia utilizada para a implementação computacional e adaptações feitas nos algoritmos, bem como os parâmetros e procedimentos para a solução do problema. Finalmente, são descritos os algoritmos de melhoria, baseados nos movimentos OPT e nas características apresentadas nas rotas formadas pelas heurísticas.

Na FIGURA 3, está representada a estrutura de desenvolvimento da pesquisa.

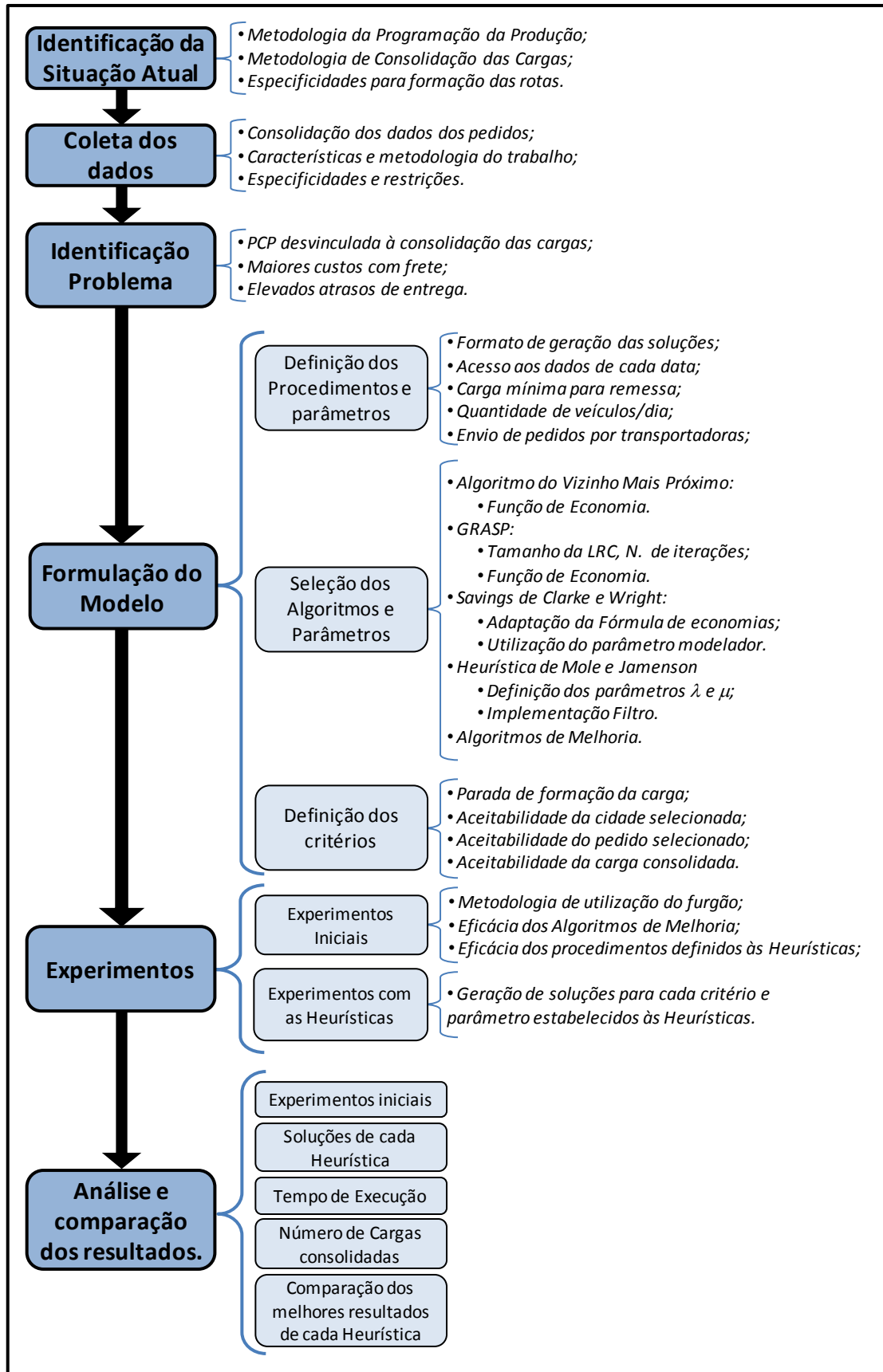


FIGURA 3 -ESTRUTURA DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

FONTE: O autor (2013).

3.1 A EMPRESA, PRODUTOS E METODOLOGIA DE TRABALHO ATUAL

A Empresa produz e comercializa embalagens tipo *Big Bag*, produtos de ráfia e os tecidos para a confecção dessas embalagens em forma de bobina, ilustrados nas FIGURAS 4, 5 e 6, respectivamente.



FIGURA 4 - EMBALAGENS BIG BAG

FONTE: http://www.rafitec.com.br/pt/produtos_big.php



FIGURA 5 - EMBALAGENS DE RÁFIA COM IMPRESSÃO

FONTE: <http://www.rafitec.com.br/pt/produtos.php>



FIGURA 6 - DE RÁFIA EM FORMA DE BOBINA

FONTE: <http://www.polijuta.com.br/wp-content/uploads/2012/02/tecidos-de-rafia-ok.jpg>

A produção da Empresa é orientada pelo setor de Programação e Controle de Produção (PCP), o qual é responsável pelo direcionamento da produção de cada fase do processo que vai, desde os tipos de fios que serão produzidos e os de tecido, até a ordenação do atendimento dos produtos finais, comercializados aos clientes.

O trabalho do PCP é realizado manualmente, baseado no conhecimento empírico adquirido ao longo dos anos de trabalho de um especialista. A programação e controle de produção são realizados através de planilhas. A forma de trabalho é efetuada praticamente da mesma maneira há vários anos, porém com o crescimento da empresa, este controle torna-se mais complicado e sujeito a erros.

A ordenação dos pedidos a serem produzidos tem como objetivo a otimização do uso dos equipamentos de maneira que possam atingir o máximo de produção em cada setor, sem levar em conta o envio dos produtos acabados aos clientes, que também é de responsabilidade da Empresa.

Com relação às cargas formadas, essas normalmente são compostas por pedidos de diversos clientes, ou seja, para que o caminhão não rode com pouca carga, é necessário agrupar certo número de pedidos a serem entregues, evitando um custo maior com fretes.

As consolidações das cargas e o roteamento dos veículos são elaborados todas as manhãs pelo setor de PCP, que verifica os pedidos que estão finalizados, prontos para a remessa. De posse dessa informação, é efetuada a consolidação das

cargas verificando possíveis rotas, baseadas no conhecimento das rotas normalmente realizadas. Após esse procedimento, o setor de PCP comunica o setor de expedição, que verifica se há veículo disponível para a entrega e, ainda, se há economia em efetuar a entrega de algum pedido por meio de uma transportadora terceirizada. Havendo economia, o pedido é retirado da carga e enviado pela transportadora, verificando ainda, se há a possibilidade de envio do restante dos pedidos. Somente após esse processo o veículo é enviado. Caso o veículo não tenha carga suficiente para ser despachado, o setor de PCP é comunicado para efetuar novamente a consolidação da carga. Desse modo, o tempo de execução de todo o trabalho para consolidação das cargas e roteamento dos veículos, leva em torno de duas horas.

Para efetuar a entrega dos produtos, a Empresa conta com frota própria composta por oito caminhões, com capacidade de carga de 14,5 toneladas e volume de 84 m³, um furgão com capacidade de carga de 4,5 toneladas e volume de 48 m³ e, ainda, frota terceirizada.

O veículo furgão é utilizado para rotas curtas, deslocando-se dentro do estado onde a Empresa em estudo está instalada. Esse veículo somente é utilizado quando da impossibilidade de consolidar uma carga para os veículos de maior porte, uma vez que há facilidade na consolidação de suas cargas.

As transportadoras terceirizadas são geralmente utilizadas para atender aos clientes mais distantes, que por essa razão, há dificuldade em consolidar uma carga, ou em casos no qual a terceirização é a forma mais econômica de entrega em relação à utilização dos veículos da frota.

3.2 O PROBLEMA E ESPECIFICIDADES

A programação de produção utilizada pela Empresa não conta com uma metodologia que considera os critérios que influenciam diretamente no custo total dos produtos, ou seja, não considera todos os pedidos dos clientes relacionando-os à consolidação das cargas e roteamento dos veículos. Não existe um planejamento da programação de produção, que direcione a formação de cargas e rotas mais econômicas.

As rotas são elaboradas considerando somente os produtos acabados naquele momento, o que dificulta a consolidação das cargas em função do menor número de opções de pedidos para compô-las. Com isso, a Empresa acaba por despachar mais de um veículo para a mesma região em datas próximas e, em alguns casos, com quantidades muito abaixo da capacidade de carga do veículo, resultando em um número maior de veículos despachados e, conseqüentemente, gerando um aumento nos custos com o frete. Da mesma forma, há produtos que permanecem estocados por um período de tempo à espera de uma carga, gerando estoque elevado e atraso no atendimento aos clientes.

Desta forma, a presente pesquisa, apresenta uma proposta para orientação do planejamento da programação de produção com direcionamento às possíveis cargas e rotas que considerem os pedidos de forma geral, objetivando estabelecer rotas mais econômicas e utilização mais eficiente dos veículos, minimizando o número de cargas despachadas e, conseqüentemente, reduzindo custos com o transporte. Isso tudo em um cenário de restrições de produção, ordenação dos pedidos, capacidade, quantidade de veículos e prazos de atendimento aos clientes.

Para tanto, foi elaborado e implementado um método, utilizando programação computacional, baseado em algoritmos matemáticos para a consolidação das cargas e o roteamento dos veículos, considerando todos os pedidos de produtos antes de serem designados à produção. Isso possibilitará que a Empresa efetue um planejamento da programação de produção direcionada também a consolidar as cargas de forma eficiente, o que implicará na redução dos custos com fretes, do tempo de estocagem dos produtos acabados e nos atrasos das entregas.

Visando nortear a pesquisa e estruturar a metodologia proposta, realizou-se o levantamento dos dados, que abrangeu o período de três meses de trabalho da Empresa. Para isso, a empresa disponibilizou as planilhas de controle dos setores de PCP, vendas e expedição, que foram registradas em um único documento, no qual foram monitoradas as informações e prospectados dados necessários para elaborar uma base de informações, possibilitando, também, a verificação dos pedidos efetuados pelos clientes e se a entrega foi efetuada dentro do prazo, e quando não, a quantidade de dias de atraso. Assim, foram definidas todas as informações necessárias para construção das soluções e posterior comparação dos resultados.

Para a obtenção dos dados, foram realizadas diversas entrevistas com os responsáveis dos setores, que estão diretamente envolvidos e detectam no dia a dia de trabalho, as principais problemáticas do sistema.

A Empresa fornece produtos específicos à cada um de seus clientes, que são comercializados periodicamente. Assim, diariamente há entrada de novos pedidos de produtos para fabricação, bem como o despacho de veículos com os produtos acabados. Dessa forma, a totalidade dos pedidos não é atendida em uma única data, sempre há saldo de pedidos a serem programados para a produção e para remessa.

Considerando as observações realizadas com o estudo, o método proposto definirá as soluções, registrando as entradas e remessas dos pedidos, referente a cada dia de trabalho dos setores de PCP e expedição, nos dias úteis. Assim, as cargas serão consolidadas e as rotas serão definidas. Na sequência, inicia-se novamente a aplicação do método no próximo dia, acrescentando os pedidos realizados aos que restaram do dia anterior, efetuando novamente a consolidação das cargas, bem como o roteamento, e assim, sucessivamente até a última data do período.

Para efetuar a consolidação das cargas dos veículos de forma a utilizá-los com máxima eficiência, foram fixadas as quantidades mínimas de peso ou volume total da carga para que o veículo seja despachado, pois devido à variação de peso e volume dos produtos, bem como da necessidade de atender os clientes dentro do prazo, muitas vezes os veículos viajam sem atingirem sua capacidade máxima.

Com base nas cargas consolidadas pela Empresa e nas informações colhidas, foram fixados os seguintes valores mínimos para despachar um veículo:

- Caminhão: mínimo de 70 m³ ou 10 ton. de produtos;
- Furgão: mínimo de 32 m³ ou 4 ton. de produtos.

Além disso, foi definido o quantitativo de veículos disponíveis para a remessa em cada dia, com base nos deslocamentos efetuados pelos veículos nas rotas elaboradas pela Empresa. Estima-se, portanto, que os veículos deslocam-se, em média, a distância de 500 quilômetros por dia, considerando todo o percurso, paradas para entrega e o retorno. Essa estimativa foi considerada para atualizar a disponibilidade de cada veículo em cada dia de consolidação de cargas.

Ainda, diariamente são efetuadas no máximo quatro cargas para os caminhões, além da carga para o furgão, devido às limitações de logística da

Empresa, envolvendo a capacidade de produção e tempo de carregamento dos veículos. Para os fretes efetuados com o furgão, são considerados os mesmos custos de deslocamento dos demais veículos, embora tenha capacidade inferior, o que resulta em maior custo total do frete.

Além da forma de consolidação das cargas, dos critérios e restrições apresentados, há um diferencial no trabalho da Empresa que afeta diretamente na utilização das heurísticas de construção das rotas.

Na empresa objeto de estudo, não é considerado no custo total do frete, os gastos referentes ao percurso de retorno do veículo. Com isso, as rotas não formam um ciclo fechado. Assim, para o cálculo do custo total das entregas é considerado apenas o trajeto entre a Empresa e seu último ponto de entrega. Isso ocorre porque os veículos são utilizados para efetuar outros trabalhos após o término da entrega de seus produtos, realizando os chamados fretes de retorno. A frota é terceirizada para efetuar o transporte de outras cargas, originários das proximidades da última cidade visitada, transportando produtos diversos às localidades próximas da região onde está localizada a sede da Empresa, tendo como objetivo a redução dos custos de frete e melhor aproveitamento no deslocamento dos veículos.

Para complementar todas as informações necessárias à elaboração das rotas, foram verificados ainda, todos os pontos de entrega (cidades). Foram identificados 321 pontos de atendimento, e coletadas suas coordenadas geográficas sobre o mapa rodoviário, utilizando as ferramentas de pesquisa do *Google Maps*³. A posteriori, com o auxílio da mesma ferramenta, foram calculadas as distâncias reais entre as cidades adjacentes. Por fim, com esses dados, foi utilizado o algoritmo *Floyd*⁴, pelo qual é possível obter o menor trajeto a ser percorrido entre uma e outra cidade, além do percurso que deverá ser efetuado, totalizando 51.360 ligações.

3 *Google Maps* é um serviço de pesquisa e visualização de mapas e imagens de satélite gratuito, pelo qual é possível verificar distâncias e rotas reais entre pontos quaisquer, entre outras aplicações.

4 Algoritmo de Floyd-Warshall, é um método que utiliza matrizes para determinar os caminhos mínimos entre todos os pares de pontos de uma rede.

3.3 HEURÍSTICAS SELECIONADAS

A seguir são apresentados os algoritmos utilizados para solução do problema em questão. Foram selecionados os algoritmos que mais se adaptam às características do problema, com os quais foram realizados diversos experimentos, com objetivo de verificar qual resulta na melhor solução para o problema.

Para a fase de construção das rotas foram selecionados o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo, *GRASP*, *Savings* de *Clarke* e *Wright* e Heurística de *Mole* e *Jameson*.

O algoritmo do Vizinho Mais Próximo foi escolhido por ser extremamente simples e de fácil implementação, possibilitando efetuar diversos testes com relação às condições de atendimento aos clientes e de novas restrições. Outro fator que nos levou à escolha desta heurística, é o fato de que se assemelha ao trabalho realizado pela Empresa, com relação à consolidação das cargas e ao roteamento dos veículos.

O algoritmo *GRASP* diferencia-se dos demais pela aleatoriedade constante na escolha dos pontos que irão compor a rota, possibilitando apresentar outras soluções que podem vir a ser mais vantajosas para a Empresa.

Em contrapartida, os algoritmos de *Clarke* e *Wright* e *Mole* e *Jameson* são classificados como algoritmos de economia, para os quais o critério de escolha é a maior economia na combinação dos pontos a serem visitados, cada um deles com características específicas. Segundo Cordeau (2002), o algoritmo de *Clarke* e *Wright* mostra-se bastante simples e de fácil implementação, especialmente pela ausência de parâmetros.

Entre as técnicas de melhoria de rotas existentes optou-se pela utilização de métodos, que serão descritos adiante, baseados na troca de arcos *K-opt*, que apresenta melhoria nas rotas com um custo computacional extremamente baixo.

3.3.1 ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO

O algoritmo do vizinho mais próximo é uma heurística gulosa, utilizada na construção de soluções com base na escolha do ponto mais próximo do último ponto selecionado. O desenvolvimento dessa heurística é atribuído a Cover e Hart (1967).

Solomon (1987) apresenta o algoritmo através da utilização de uma matriz com o objetivo de definir a distância entre os pontos. Desse modo, o percurso é construído com base nessas distâncias, sendo o mais próximo da origem adicionado como primeiro ponto de atendimento e os demais pontos adicionados posteriormente.

O algoritmo inicia o ciclo com um dos pontos do grafo (s), que no caso do problema abordado será o depósito. Depois seleciona o próximo ponto (v), de forma que tenha a mínima distância até s . Após selecionar v , ele é inserido no final da rota. A operação é repetida até que todos os pontos sejam atendidos.

A FIGURA 7 ilustra a aplicação da heurística, o ponto D representa o depósito, onde a rota é iniciada, os pontos 1 a 5, são os pontos de atendimento. Na FIGURA 7 (a) é selecionado o ponto mais próximo do depósito para iniciar a rota, depois são adicionados os pontos mais próximos do último visitado (FIGURAS 7(b) e 7(c)). Já a FIGURA 7 (d)), ilustra a rota finalizada.

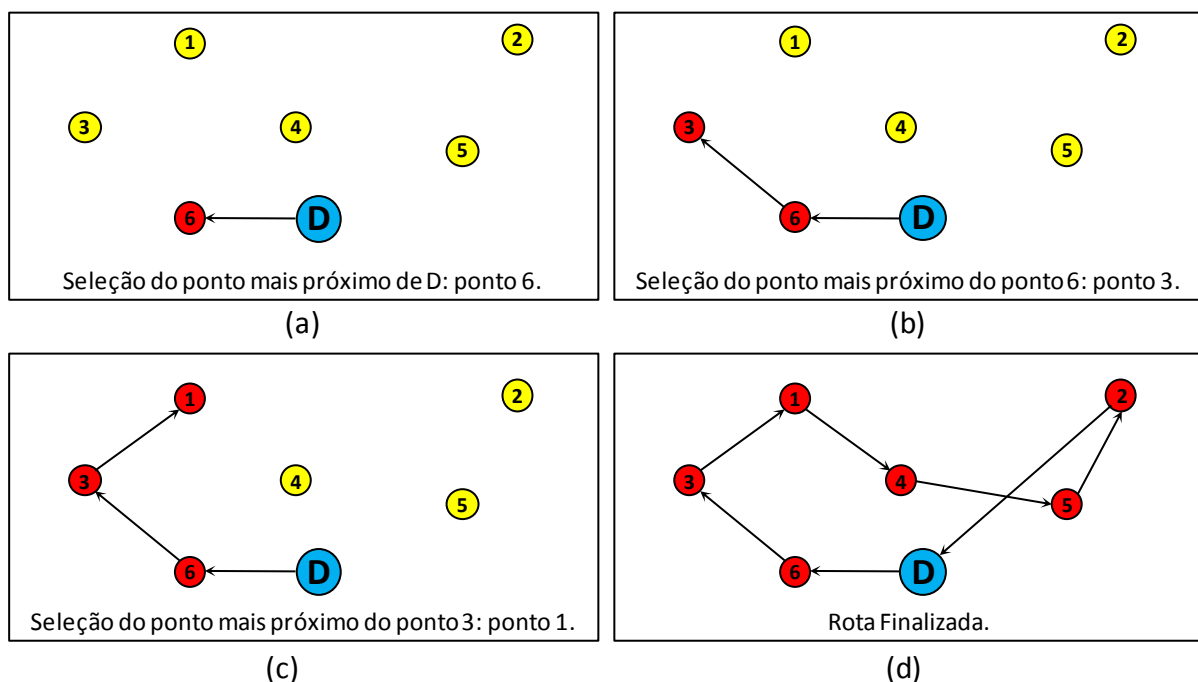


FIGURA 7 - ILUSTRAÇÃO DA APLICAÇÃO DO ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO
FONTE: O autor (2013).

Ainda, segundo a metodologia da heurística, não é permitido visitar um nó mais de uma vez ou modificar a escolha, ou seja, após um nó ser inserido numa determinada posição da rota, ele não sofrerá modificação de posicionamento (BODIN, 1983).

O pseudocódigo da Heurística do Vizinho Mais Próximo está descrito no QUADRO 1, onde s é o ponto selecionado para iniciar a rota, v representa o último ponto que foi adicionado na rota e w o próximo ponto que será adicionado.

PASSO 1: Marcar todos os nós como não visitados.
PASSO 2: Escolher algum nó s como ponto de partida, e marcar s como visitado. Fazer $v = s$.
PASSO 3: Repetir enquanto houver nós a serem visitados:
 Escolher o nó w não visitado mais próximo de v .
 Marque w como visitado.
 Estabelecer ligação entre v e w e fazer $v = w$.
PASSO 4: Estabelecer a ligação do nó v até o nó s , para concluir o ciclo

QUADRO 1 - PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO

Para aplicar este algoritmo ao problema abordado, foi excluída a ligação do último ponto de entrega ao depósito, deixando de ser estabelecido um ciclo fechado.

3.3.1.1. Critério de aceitação da cidade na rota

A seleção das cidades a serem inseridas na rota, utilizando o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo não decorre de nenhum outro critério, além da menor distância, por este motivo são formadas rotas com clientes muito próximos ao depósito, deixando de atender os pontos mais distantes que serão inseridos em outras rotas com custo maior.

Para que o algoritmo apresente resultados mais adequados foi implementado um procedimento para evitar a formação dessas rotas. Assim, quando a distância entre um novo cliente k e o depósito é menor do que a distância entre o último cliente da rota e o cliente k , este é designado para outra rota, e é dada sequencia a inserção de clientes verificando os demais candidatos. Esta situação está ilustrada na FIGURA 8.

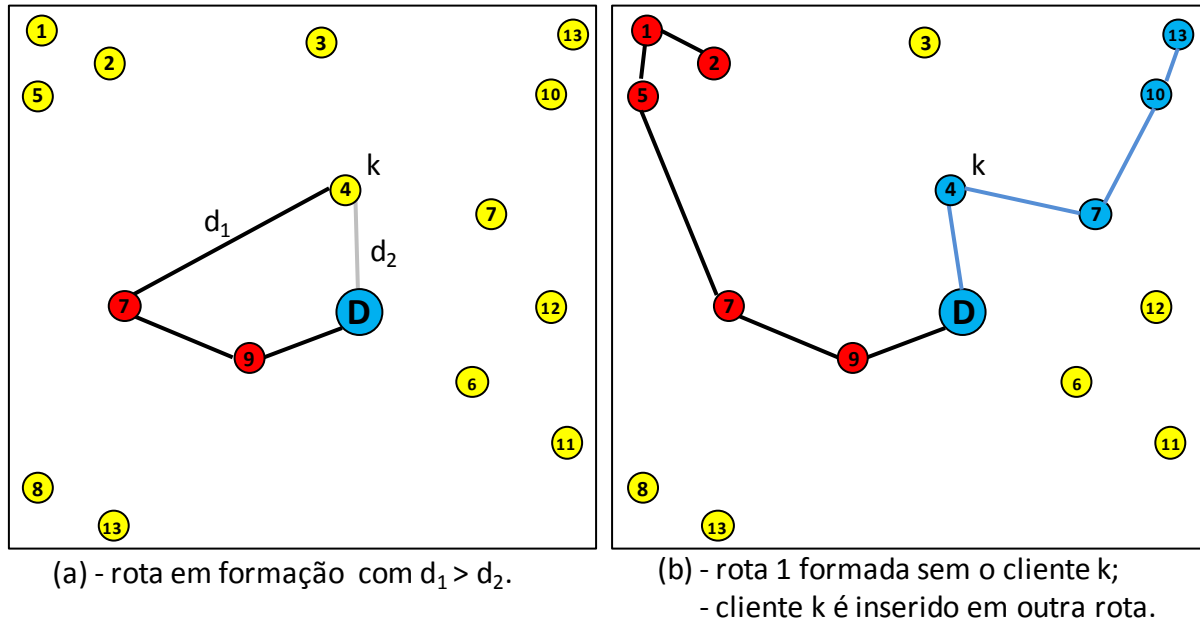


FIGURA 8 - CORREÇÃO NA FORMAÇÃO DA ROTA
 FONTE: O autor (2013).

Na FIGURA 8(a), onde o ponto 4 (cliente k) é candidato à rota, verifica-se que $d_2 < d_1$. Assim, é mais econômico determinar outro veículo para atendê-lo, ao invés de inseri-lo na rota em formação. O ponto 4 será designado para a próxima rota, e é dado continuidade a formação da primeira rota, inserindo os demais clientes, verificando essa situação para cada um deles.

3.3.2 GRASP

A Heurística *GRASP*, do inglês *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*, ou Procedimento de Busca Gulosa Aleatória e Adaptativa, desenvolvida por Feo e Resende (1989, 1995) é um algoritmo amplamente utilizado na resolução de problemas de otimização combinatória, que consiste num método iterativo probabilístico, onde a cada aplicação é estabelecida uma solução diferente do problema.

Além da ampla utilização nos problemas de roteamento de veículos, também se encontram na literatura diversos trabalhos com sua utilização, aplicado à problemas de corte, redes, escalonamento de tarefas, classificação e particionamento, dentre outros.

Segundo Quintieri (2005), o *GRASP* é uma meta-heurística *multi-start*, isto é, significa que entre uma iteração e outra, todo o processo de construção e refinamento de uma solução é reiniciado, tornando as iterações independentes. O número de iterações é um parâmetro que deve ser configurado conforme a estratégia de abordagem do problema em estudo.

O algoritmo é composto de duas fases, sendo a primeira de construção e a segunda de melhoria da solução, ou conforme classificam Goldberg e Luna (2005), uma de diversificação e outra de intensificação. A primeira constitui uma solução inicial para o problema, em que cada ponto a ser adicionado na solução é selecionado aleatoriamente em uma lista restrita de candidatos (RCL – *restricted candidate list*), definida de acordo com o critério de escolha de um algoritmo guloso, o que fornece uma diversificação das soluções encontradas.

Depois de definida a solução inicial pelo *GRASP*, é dado início à segunda fase da meta-heurística, que consiste em aplicar procedimentos de melhoria à solução, sendo realizada uma busca local em torno da solução gerada, já que não há garantia de que a solução da primeira fase seja a ótima. As buscas são realizadas de modo iterativo, através de um algoritmo de melhoria. Quando nenhuma solução melhor é encontrada, o procedimento é encerrado. O *GRASP* apresenta vantagens pela simplicidade, rapidez e facilidade em ser integrado com outras técnicas de busca (Freddo e Brito, 2008).

No QUADRO 2, está representado o pseudocódigo de um algoritmo *GRASP* para o problema de roteamento de veículos.

<p>PASSO 1: Elaborar a lista restrita de candidatos de acordo com o algoritmo guloso, em relação ao depósito.</p> <p>PASSO 2: Sortear algum nó da lista restrita. Acrescentar o nó na solução e marcá-lo como visitado.</p> <p>PASSO 3: Repetir enquanto houver nós não visitados: Elabore a lista restrita de candidatos, com os nós não visitados, em relação ao último nó visitado. Sortear um nó da lista restrita. Acrescentar o nó na solução. Marcar o nó como visitado.</p> <p>PASSO 4: Fechar o ciclo ligando o último nó visitado ao nó inicial.</p> <p>PASSO 5: Aplicar o procedimento de melhoria até encontrar o ótimo local. Armazenar a solução se for melhor a que a anterior.</p> <p>PASSO 6: Se a iteração for menor ou igual ao máximo de iterações definida, reiniciar a aplicação do algoritmo, caso contrário, fim do algoritmo.</p>
--

QUADRO 2 - PSEUDOCÓDIGO DA HEURÍSTICA *GRASP* PARA PRV

3.3.2.1. Implementação e parâmetros

Para a primeira fase do *GRASP*, o critério de seleção utilizado foi o sorteio de uma entre as n cidades mais próximas do último ponto selecionado.

A cada seleção são calculadas as distâncias entre a última cidade selecionada e todas as demais que não foram atendidas. É formada então, a Lista Restrita de Candidatas com as n cidades mais próximas. Foram efetuados experimentos com a Lista Restrita com quantidades entre 2 (duas) e 5 (cinco) cidades. A quantidade máxima para as simulações foi fixada em 200 (duzentas).

Para a segunda fase do *GRASP*, foram utilizados os algoritmos de melhoria das soluções, abordados na seção 3.3.5.

Nos testes iniciais com a heurística, também se verificou a formação de rotas que não atendiam às necessidades da Empresa, conforme descrito no Algoritmo do Vizinho Mais Próximo, dessa forma, também foram efetuados experimentos no que concerne à utilização do procedimento descrito na seção 3.3.1.1.

3.3.3 HEURÍSTICA DOS SAVINGS DE CLARKE E WRIGHT

A Heurística dos *savings* de *Clarke e Wright* (1964) é um dos algoritmos iterativos construtivos mais conhecidos na literatura. Desenvolvido inicialmente para resolver o problema clássico de roteamento de veículos, ainda é muito utilizada, inclusive, em conjunto com outros procedimentos.

Assim, baseando-se no conceito de economias relacionadas às combinações entre as rotas, que podem ser obtidas tanto pela distância percorrida, quanto pelo custo ou tempo do deslocamento, dá-se início ao algoritmo estabelecendo uma rota entre cada cliente e o depósito.

Para o cálculo das economias, utiliza-se a equação (1):

$$S_{ij} = c_{i0} + c_{j0} - c_{ij} \quad (1)$$

Onde:

- S_{ij} é a economia obtida ao combinar as rotas dos clientes i e j ;
- c_{i0} é o custo de deslocamento entre o cliente i e o depósito;

- c_{jo} é o custo de deslocamento entre o cliente j e o depósito;
- c_{ij} é o custo de deslocamento entre os clientes i e j .

A FIGURA 9 mostra as rotas iniciais formadas para o atendimento de dois pontos de demanda, para os quais se estabelecem as rotas 1 e 2, entre o depósito e os clientes i e j . A FIGURA 10 ilustra a rota resultante da combinação das duas rotas anteriores.

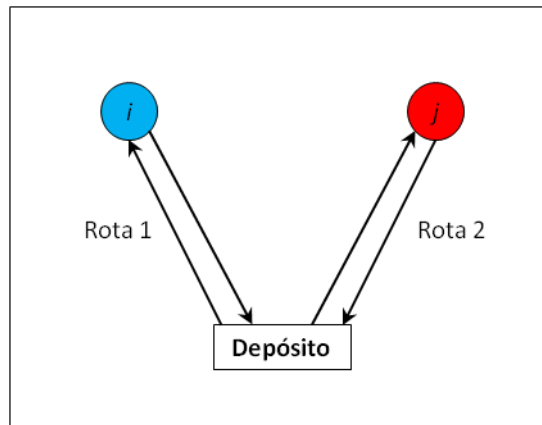


FIGURA 9 - ROTAS ENTRE O DEPÓSITO E OS CLIENTES I E J.
FONTE: O autor (2013).

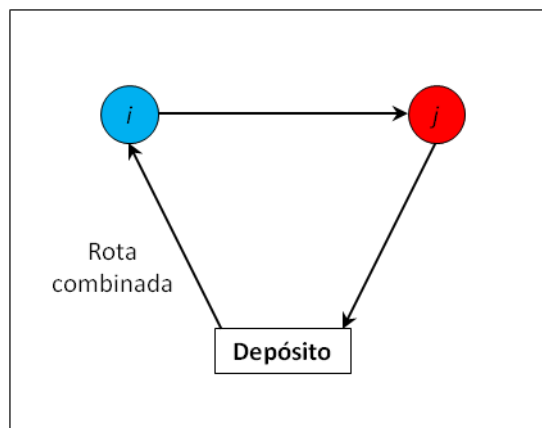


FIGURA 10 - ROTA RESULTADO
FONTE: O autor (2013).

Dessa forma, quando n pontos devem ser atendidos, são construídas n rotas, cada uma delas entre o depósito e os pontos. Então, são calculadas as economias para todas as possíveis rotas e é criada uma lista ordenada. A rota é iniciada combinando os dois clientes que apresentarem maior economia na combinação de suas rotas. Em seguida são acrescentados os demais clientes, selecionando o próximo que apresenta a maior economia ao ser combinado com a rota em formação. Os novos pontos só podem ser inseridos no início ou no final da rota, dessa forma, a

rota é expandida apenas nos seus extremos. O procedimento incremental continua até que nenhuma combinação possa ser efetuada.

A FIGURA 11 ilustra a formação de uma rota aplicando o algoritmo de *Clarke* e *Wright*, onde o ponto “D” representa o depósito e os pontos de 1 a 6, os clientes. Na FIGURA 11 (a) estão distribuídos os clientes e o depósito; na FIGURA 11 (b) são estabelecidas as rotas entre o depósito e todos os clientes; na FIGURA 11 (c) é iniciada a combinação das rotas para os clientes que apresentam maior economia ao serem combinados e, por fim, nas FIGURA 11 (d) até a FIGURA 11 (f) são representadas as inclusões dos demais clientes por meio da expansão da rota seguindo os critérios do algoritmo.

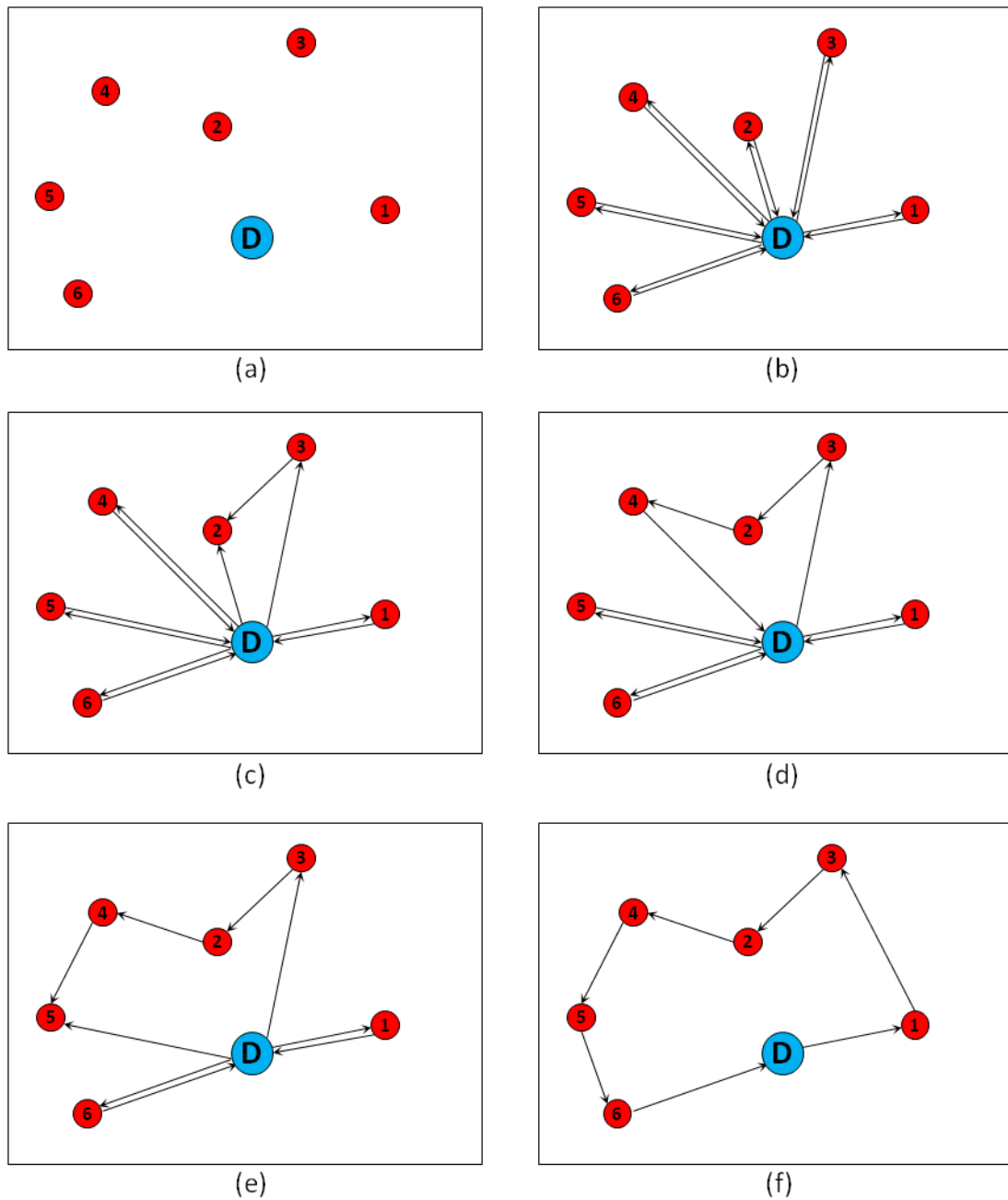


FIGURA 11 - ILUSTRAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO ALGORITMO DE CLARKE E WRIGHT
 FONTE: O autor (2013).

O pseudocódigo da heurística das economias de *Clarke* e *Wright* (1964) está representado no QUADRO 3.

- PASSO 1:** Definir uma rota entre cada cliente e o depósito.
- PASSO 2:** Calcular as economias para todas as combinações 2 a 2, da forma:

$$S_{ij} = c_{i0} + c_{j0} - c_{ij} \quad \forall i, j$$
- PASSO 3:** Classificar economias de forma decrescente.
- PASSO 4:** Combinar os 2 clientes classificados com maior economia;
 Remover a economia da combinação utilizada da lista de economias.
- PASSO 5:** Repetir até não ser mais possível efetuar combinações:
 Verificar na lista de economias, a maior economia nas possíveis combinações com o primeiro e o último cliente da rota.
 Expandir a rota, adicionando o cliente selecionado.
 Remover a economia da combinação utilizada da lista de economias.
- PASSO 6:** Quando todos os clientes tiverem sido incluídos num roteiro, fim.

QUADRO 3 - PSEUDOCÓDIGO DA HEURÍSTICA DE CLARKE E WRIGHT

Como no algoritmo de *Clarke e Wright* (1964) são estabelecidas, inicialmente uma rota para atender a cada cliente, supõe-se a existência de um veículo para cada cliente, os ajustes em relação ao número real de veículos existentes vão sendo feitos durante a combinação das rotas.

Silva (2003) destaca que os maiores ganhos são dos pontos mais afastados do depósito e mais próximos entre si. Assim, a rota é iniciada pelos clientes mais distantes e, na medida em que a carga é consolidada, a rota vai se aproximando do depósito.

Santos (2007) apresenta uma análise referente à aplicações do algoritmo de *Clarke e Wright* (1964), mostrando alguns pontos fracos da heurística, como apontado por Cordeau *et al.* (2002). Segundo os autores, o algoritmo produz boas rotas no início, porém tende a realizar uniões que resultam em rotas não muito mais extensas. E ainda, em algumas situações, o tempo de processamento pode tornar-se alto.

Devido à necessidade de incorporar diferentes parâmetros e restrições dos problemas mais específicos, diversos autores têm efetuado propostas de adaptação no algoritmo. Nesse sentido, Queiroz (2012) apresentaram propostas que foram implementadas por Golden *et al.* (1984). A alteração se deu na fórmula para o cálculo das economias do algoritmo. Os autores também testaram a performance computacional dos métodos nos *benchmarks* propostos por Solomon (1987).

Uma das propostas de abordadas por Golden *et al.* (1984), denominada Oportunidade Real de Economia com parâmetro modelar ($ORE\lambda$), que modifica a fórmula dos *savings* de *Clarke e Wright* (1964) para:

$$S_{ij} = c_{0i} + c_{j0} - \lambda c_{ij} \quad (2)$$

Queiroz (2012).

Pelizaro (2000) cita as alterações propostas por *Gaskel* (1967) e *Yellow* (1970), que alteram a fórmula de *Clarke* e *Wright* (1964) da mesma forma que o proposto na $ORE\lambda$. Classificando λ como um parâmetro escalar, conforme sua alteração, surgirão diferentes soluções, sendo possível dar maior ou menor ênfase aos custos entre dois clientes.

Yellow (1970) descreve casos para os valores de λ , em que $\lambda = 1$, a heurística continua com sua formulação proposta inicialmente, quando $\lambda = 2$, trata-se da proposta de *Gaskell* (1967), e ao aumentar o valor de λ é dada maior ênfase a distância entre os pontos.

3.3.3.1. Adaptação da fórmula de economias e definição dos experimentos

No problema abordado nesta pesquisa, o custo do retorno dos veículos até a Empresa não é levado em consideração nos cálculos, por este motivo foi retirado o um dos termos da fórmula de economias, que passou a ser definida pela equação 3.

$$S_{ij} = c_{jo} - c_{ij} \quad (3)$$

onde:

- S_{ij} é a economia obtida ao combinar as rotas dos clientes i e j ;
- c_{jo} é o custo de deslocamento entre o depósito e o cliente j ;
- c_{ij} é o custo de deslocamento entre os clientes i e j .

A FIGURA 12 ilustra como serão construídas as rotas para o problema com a metodologia da Heurística de *Clarke* e *Wright*. Na FIGURA 12 (a) constam uma rota para cada cliente i e j , e nas FIGURAS 12 (b) e (c) as possíveis soluções ao combinar as rotas 1 e 2.

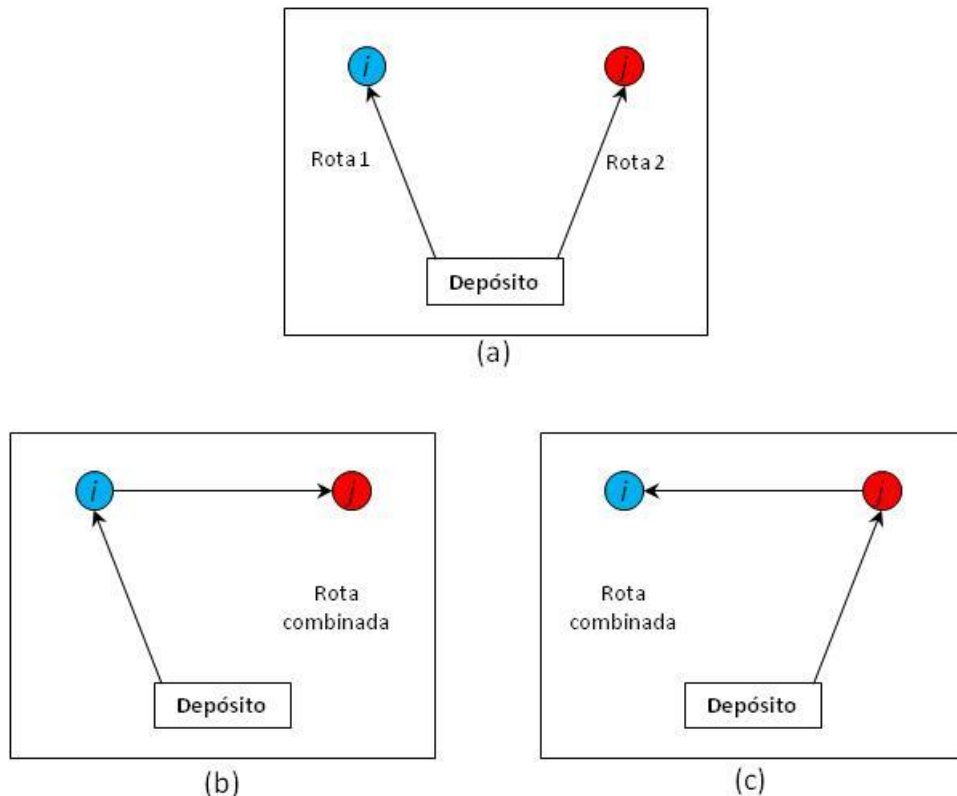


FIGURA 12 - COMBINAÇÃO DAS ROTAS ATRAVÉS DA METODOLOGIA DA HEURÍSTICA DE CLARKE E WRIGHT ADAPTADA AO PROBLEMA
 FONTE: O autor (2013).

Há duas possibilidades de combinação das rotas, considerando que $S_{ij} \neq S_{ji}$, onde S_{ij} é a economia para combinar as rotas visitando inicialmente o cliente i , e j na sequência, e S_{ji} é a economia para visitar primeiramente o cliente j , e em seguida o cliente i .

O percurso a ser avaliado ao combinar as rotas 1 e 2, é construído considerando a exclusão do trajeto do depósito até o cliente j , e a inserção do trajeto entre os clientes i e j na nova rota definida (FIGURA 12 (b)). Na FIGURA 12 (c), a economia será relativa à exclusão do percurso entre o depósito e o cliente i e a adição do percurso entre os clientes.

Porém, depois de aplicar a heurística em sua proposta original, para o problema em questão, não se obteve os resultados esperados, conforme pode ser observado na FIGURA 13, que ilustra uma das rotas geradas nos testes iniciais, onde o círculo preto representa o depósito (Empresa), os círculos ligados por segmentos de retas representam os clientes (cidades que compõem a rota), e os demais, as cidades com demanda de entrega, na data da consolidação da carga, que não foram contemplados na rota formada. Na figura é possível observar que o

algoritmo direciona a rota para um percurso longo, devido a uma das características da heurística que é a de selecionar os clientes mais distantes do depósito, resultando em soluções finais inadequadas, conforme destacam Laporte e Semet (2002).

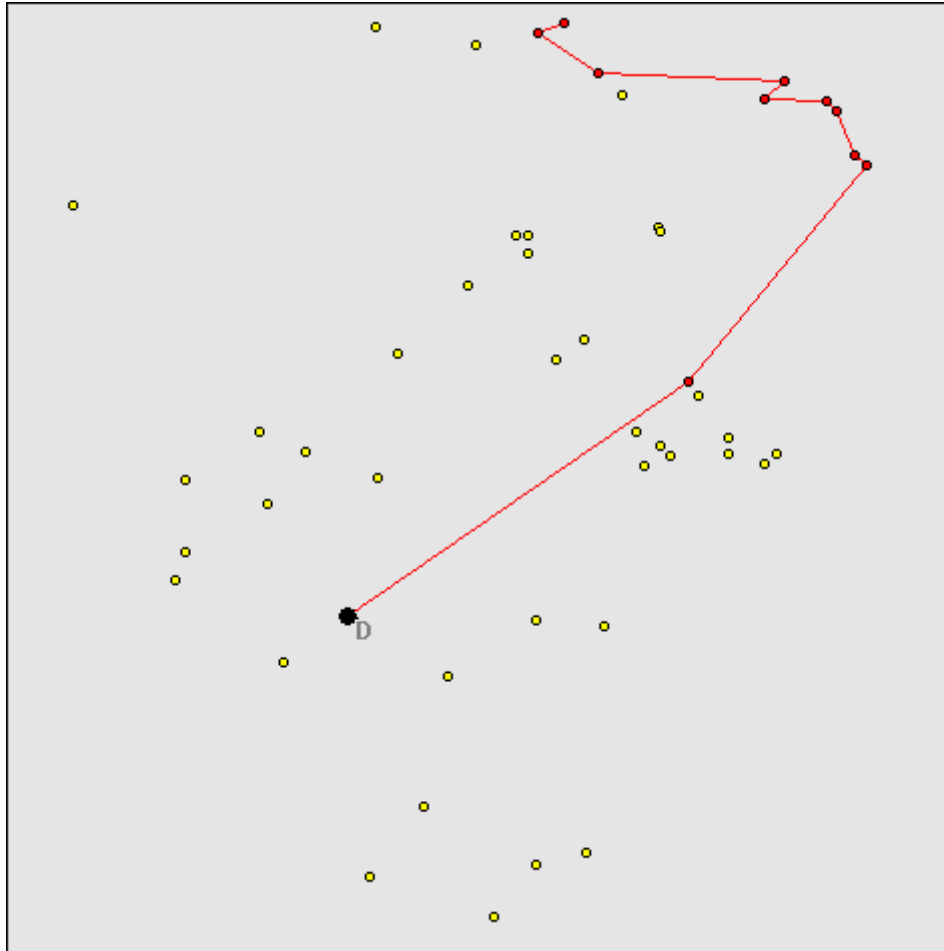


FIGURA 13 - ROTA CONSTRUÍDA PELO ALGORITMO DE CLARKE E WRIGHT.

FONTE: O autor (2013).

Com o objetivo de contornar essa situação e ainda, explorar um universo maior de soluções, optou-se pela utilização da fórmula com parâmetro modelador, proposta por Gaskel (1967) e Yellow (1970). Assim, a fórmula de economia utilizada foi a da equação 4:

$$S_{ij} = c_{j0} - \lambda c_{ij} \quad (4)$$

Onde:

- S_{ij} é a economia obtida ao combinar as rotas dos clientes i e j ;
- c_{0j} é o custo de deslocamento entre o depósito e o cliente j ;
- c_{ij} é o custo de deslocamento entre os clientes i e j ;

- λ é o parâmetro modelador.

Com a inserção do parâmetro λ , é adicionado um peso à distância entre os pontos, assim nos experimentos realizados foram utilizados valores para o parâmetro entre 0,5 a 3, com incremento de um décimo em cada experimento. Os resultados obtidos com a introdução deste parâmetro são apresentados na seção 4.4.

3.3.4 ALGORITMO DE MOLE E JAMESON

A Heurística de *Mole e Jameson* (1976) é, também, uma das heurísticas clássicas para encontrar a solução de problemas de roteamento de veículos, classificada como algoritmo de economias. Esta é considerada mais sofisticada do que a dos *savings* de *Clarke e Wright* (1964), pois entre outras características, a principal é tentar reduzir a fragilidade daquela, que é a dos nodos internos não serem candidatos ao teste de economia (GOLDBARG; LUNA, 2000). Dessa forma, o algoritmo efetua testes para todas as possíveis combinações entre os pontos da rota iniciada e os que poderão fazer parte da rota, tornando o algoritmo mais demorado, apresentando como principal desvantagem: a complexidade computacional (HEINEN, 2005).

O algoritmo é iniciado, selecionando o primeiro cliente que fará parte da rota, utilizando algum critério determinado. Após a seleção do primeiro cliente, inicia-se a heurística propriamente dita. A inserção de um novo cliente na rota é realizada de acordo com dois critérios: o de proximidade e o de economia. No primeiro, são verificadas as distâncias que são adicionadas à rota, ao inserir cada cliente em todas as possíveis posições, ou seja, verificando através da fórmula de economias (Equação 5) qual cliente está mais próximo da rota.

$$e(i, l, j) = c_{il} + c_{lj} - \mu c_{ij} \quad (5)$$

Onde:

- i e j representam os pontos que fazem parte da rota;
- l representa o ponto que poderá ser adicionado à rota;

- $e(i,l,j)$ é o valor que será acrescido à distância total da rota, ao adicionar o ponto l entre os pontos i e j ;
- c_{il} é a distância entre os pontos i e l ;
- c_{lj} é a distância entre os pontos l e j ;
- c_{ij} é a distância entre os pontos i e j ;
- μ é um parâmetro utilizado para alterar o comportamento do algoritmo, dando maior ou menor ênfase à distância que será excluída da rota ao adicionar o novo ponto.

O cliente a ser inserido na rota é o que apresentar a menor distância, calculada através da equação (6).

$$\sigma(i, l, j) = \lambda c_{ol} - e(i, l, j) \quad (6)$$

Onde:

- $\sigma(i, l, j)$ representa a economia ao inserir o cliente l entre os clientes i e j ;
- c_{ol} é a distância entre o depósito e o cliente l ;
- λ é outro parâmetro para alterar o comportamento do algoritmo, dando maior ou menor ênfase a distância que será adicionada à rota.

Quando a fórmula de economia apresenta valores negativos, demonstra que não é economicamente viável inserir este cliente na rota em construção, isso ocorre quando é mais econômico enviar outro veículo para atender esse cliente, ao invés de adicioná-lo à rota.

Goldbarg e Luna (2000) apresentam algumas análises, para diferentes valores dos parâmetros:

- $\mu = 0$ e $\lambda = 1$, a inserção é realizada considerando a menor distância para a inserção de um novo ponto na rota;
- $\mu = 0$ e $\lambda = 0$, a inserção é realizada considerando a menor distância entre os dois nós vizinhos;
- O caso em que $1 \leq \lambda \leq 2$ e $\mu = \lambda - 1$, é uma generalização do critério de Gaskell (1967);
- Com $\mu \rightarrow \infty$ e $0 < \lambda < \infty$, a inserção ocorrerá para o cliente mais distante do depósito.

A FIGURA 14 ilustra a solução obtida para as rotas utilizando o Algoritmo de *Mole* e *Jameson*, onde o ponto “D” representa o depósito e os pontos 1 a 6, os clientes. Na FIGURA 14 (a) estão representados os clientes e o depósito; na

FIGURA 14 (b) é mostrado o primeiro cliente a ser atendido e na FIGURA 14 (c) a rota é expandida inserindo o cliente 3.

A partir disso, é economicamente inviável inserir outros clientes, inicia-se então, uma nova rota (FIGURA 14 (d)). As demais rotas são apresentadas nas FIGURAS 14 (e) e (f).

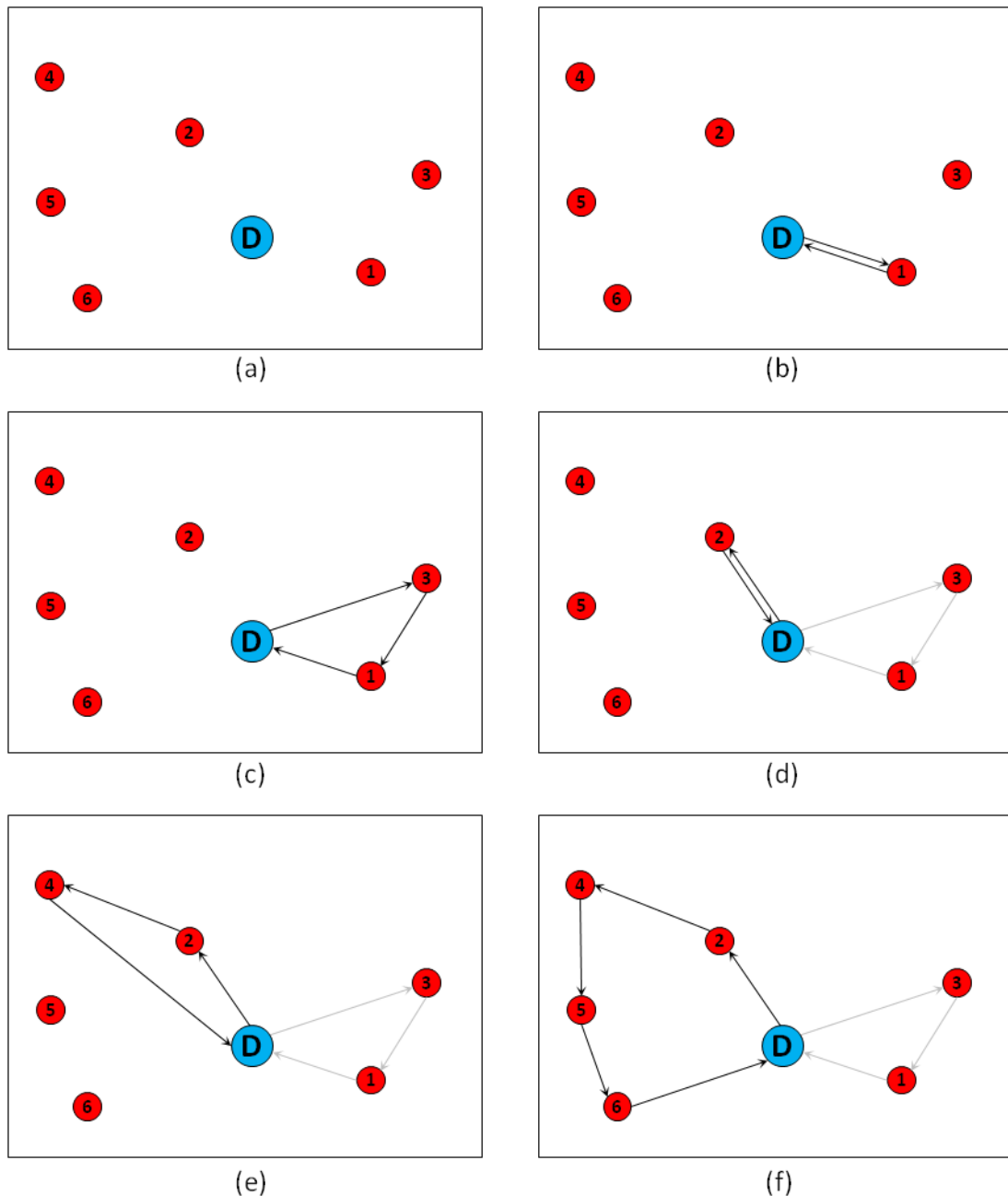


FIGURA 14 - ILUSTRAÇÃO DA CONSTRUÇÃO DAS ROTAS UTILIZANDO O ALGORITMO DE MOLE E JAMESON
FONTE: O autor (2013).

O pseudocódigo da Heurística de *Mole* e *Jameson* (1976) está representado no QUADRO 4.

PASSO 1: Selecionar o cliente a ser atendido, segundo o critério estabelecido, que não esteja contemplado em nenhuma rota;
 Marcar o cliente como atendido.

PASSO 2: Calcular os custos de inserção de cada cliente não atendido, para as possíveis combinações na rota, através da primeira fórmula ($e(i, l, j) = c_{il} + c_{lj} - \mu c_{ij}$);

PASSO 3: Ordenar os resultados dos custos de inserção de forma crescente.

PASSO 4: Selecionar o cliente que apresentar menor custo de inserção e que apresenta economia positiva, segundo a fórmula de economias ($\sigma(i, l, j) = \lambda c_{ij} - e(i, l, j)$);
 Inserir o cliente no ponto selecionado e voltar ao PASSO 2;
 Se não houver cliente selecionado, finalizar a rota;

PASSO 6: Se houver clientes a serem atendidos voltar ao PASSO 1, caso contrário, fim.

QUADRO 4 - PSEUDOCÓDIGO DA HEURÍSTICA DE MOLE E JAMESON.

Heinen (2005) comparou a eficiência dos algoritmos de *Mole* e *Jameson* e dos *savings* de *Clarke* e *Wright*, aplicando-os à cinco problemas. Os resultados obtidos neste trabalho estão descritos na TABELA 1, em que o tamanho representa o número de pontos de atendimento; o custo representa a distância total a ser percorrida na solução obtida pelo algoritmo e o tempo processamento está expresso em segundos. Na tabela também é apresentada a comparação entre os resultados obtidos pelos algoritmos, onde as diferenças das distâncias totais das rotas estão expressas em porcentagem, e os tempos de execução dos algoritmos em segundos.

TABELA 1 - COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS POR HEINEN (2005)

Tamanho	<i>Clarke e Wright</i>		<i>Mole e Jameson</i>		Diferença	
	Tempo	Custo	Tempo	Custo	Tempo	Custo
100	0.01	830.04	0.14	583.91	0.13	29.65%
500	0.57	1869.04	26.58	1239.57	26.01	33.67%
1000	4.20	2755.31	276.10	1782.23	271.90	35.32%
1500	19.62	3304.41	106.47	2083.01	1076.85	36.96%
2000	46.23	2873.31	273.83	2538.00	2927.60	34.47%

FONTE: HEINEN (2005)

Pode-se verificar que para os problemas citados, o algoritmo *Clark* e *Wright* é mais rápido que o de *Mole* e *Jameson* e, que a diferença do tempo de processamento torna-se muito maior à medida que cresce o número de pontos a serem visitados, no entanto, segundo Heinen (2005), o algoritmo de *Mole* e *Jameson* é superior ao de *Clarke* e *Wright* em função do resultado obtido, fornecendo rotas em média 35% mais econômicas.

3.3.4.1. Definição dos experimentos

Para a utilização da Heurística de *Mole* e *Jameson* ao problema abordado nesta pesquisa, determinou-se para início da rota, a seleção da cidade mais próxima à Empresa. É definido também um filtro que é ativado durante a construção das rotas, que reduz o número de cidades candidatas, reduzindo o tempo computacional.

Para isso, determinaram-se regiões de atendimento, com base nas informações coletadas na Empresa e em seu histórico de trajetos percorridos, utilizando as coordenadas cartesianas das cidades. Assim, quando uma rota é iniciada, somente são selecionadas as cidades que estão na mesma região em que a primeira cidade está inserida, para serem candidatas à seleção, reduzindo assim, o número de cálculos realizados pela heurística.

Os valores utilizados para os parâmetros μ e λ foram os seguintes:

- $\mu = 0$ e $\lambda = 1$;
- $\mu = 0$ e $\lambda = 0$;
- $\mu = 1$ e $\lambda = 0$;
- $1 \leq \lambda \leq 2$ e $\mu = \lambda - 1$, com incremento de um décimo;
- $\mu \rightarrow \infty$ e $0 < \lambda < \infty$.

Os resultados obtidos com a utilização da heurística são apresentados na seção 4.5.

3.3.5 ALGORITMOS DE MELHORIA

Os procedimentos de melhoria têm o propósito de aplicar métodos que modificam uma solução previamente definida por um algoritmo de construção, tendo como objetivo apresentar redução nos custos. Em geral, os algoritmos de melhoria são aplicados ao Problema de Roteamento de Veículos (PRV), operando em uma rota específica ou em várias rotas ao mesmo tempo. São chamados também de

algoritmos de busca local, uma vez que são heurísticas que visam aprimorar soluções obtidas por outros métodos.

As melhorias são obtidas por meio da ideia de busca em vizinhanças, definidas como um subconjunto das soluções viáveis, que podem ser obtidas a partir da aplicação de uma operação predefinida sobre uma solução base dada (QUINTIERI, 2005).

Uma das heurísticas de melhoria amplamente utilizadas para reduzir custos no problema de roteamento de veículos é o *k-OPT*, que consiste em estratégias que partem de um circuito inicial, tentando melhorá-lo por meio de trocas na ordem em que os clientes serão visitados. Segundo Lin e Kernighan (1965) as trocas são efetuadas desligando *k* arcos que serão substituídos por novos *k* arcos, se a troca resultar numa redução na distância da rota, a troca é aceita.

Quintieri (2005) destaca três questões que fundamentam a construção de uma busca local:

- Definição da vizinhança;
- Estratégias de busca na vizinhança;
- Complexidade de cada iteração.

O autor ainda descreve cinco métodos de busca local para a melhoria das rotas construídas pelos algoritmos do Vizinho Mais Próximo, *Clarke e Wright* e *GRASP*, utilizadas em seu trabalho:

- Eliminar Rotas: aloca clientes de uma rota em outras rotas construídas, objetivando reduzir o número de veículos utilizados;
- Troca nos Atendimentos: experimenta a troca no atendimento de uma determinada rota para uma segunda rota, eliminando a que possuir maior custo;
- Trocar Atendimentos entre rotas: verifica a redução no custo total ao trocar um cliente de uma rota, por um cliente de outra rota;
- Resequenciar Atendimentos: promove a troca na ordem dos atendimentos observando os novos custos;
- Inserir Atendimentos: visa inserir clientes não atendidos em rotas já existentes.

Existem diversos métodos de troca de atendimentos que podem alcançar um ótimo local com baixo esforço computacional. Dessa forma, é necessária a

verificação de diversos aspectos do problema, bem como dos resultados encontrados, para então, determinar aqueles que melhor se adaptam e proporcionam melhorias efetivas nas soluções.

Como a localização da Empresa é, de certa forma, central em relação aos clientes, e uma de suas restrições é a de não remeter mais de um veículo para a mesma região num mesmo dia, as metodologias de busca local utilizadas serão apenas intrarrotas. Assim, no que concerne à ordem de visita às cidades que compõem a rota, são efetuados quatro tipos de movimentos, baseados nas observações efetuadas nas rotas formadas pela Empresa e pelos resultados apresentados nos primeiros testes dos algoritmos de construção.

No primeiro método, a rota é reconstituída, utilizando para isso, o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo, ou seja, refazendo a ordem de atendimento das cidades de acordo com a maior proximidade do último ponto visitado.

Depois, são efetuados experimentos, alterando a posição das cidades uma a uma, para cada ponto possível da rota, inserindo-a entre outros dois pontos da rota, testando todas as possíveis alterações.

A FIGURA 15 ilustra como essas alterações são efetuadas, considerando o depósito e quatro cidades de entrega; a FIGURA 15 (a) representa a rota inicial, saindo do depósito e passando pelas cidades 1, 2, 3 e 4; a FIGURA 15 (b) ilustra os possíveis movimentos, já excluídos alguns movimentos que resultariam na mesma alteração já testada pelo método anterior; e por último, a FIGURA 15 (c) mostra as rotas resultantes dos movimentos, onde os pontos que sofreram movimentação foram alterados para a cor mais clara.

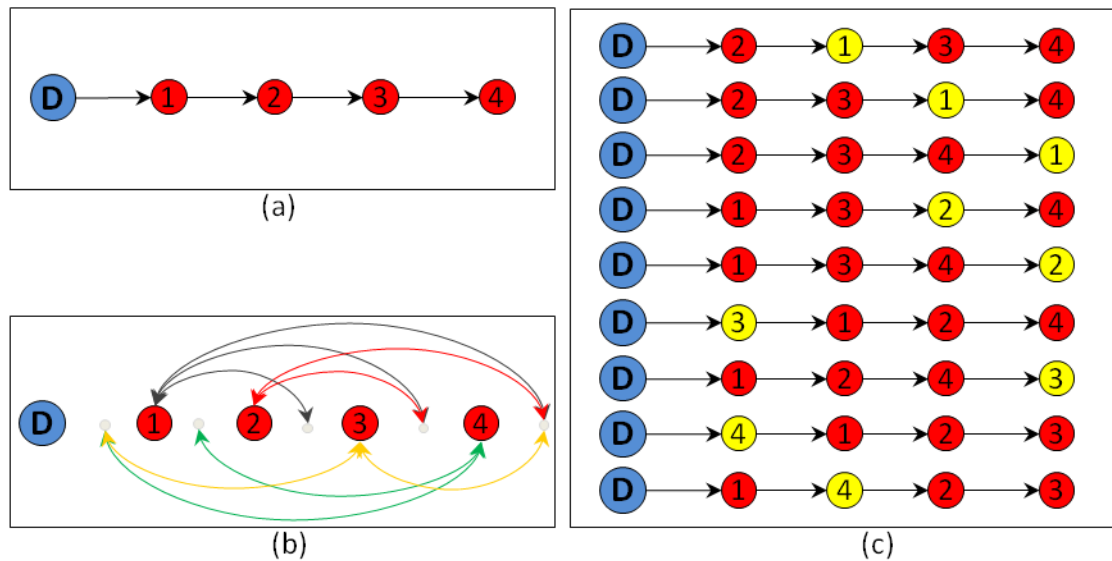


FIGURA 15 - ILUSTRAÇÃO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE BUSCA LOCAL MUDAR ATENDIMENTO DA CIDADE DE DEMANDA
FONTE: O autor (2013).

Depois, são efetuadas trocas das posições das cidades na rota, duas a duas, sendo que em um dos movimentos o restante da rota permanece inalterado. Já no outro, quando há mais que um ponto de atendimento entre as cidades que foram trocadas, a ordem de visita desses pontos é invertida.

A FIGURA 16 ilustra a movimentação nas rotas. Estão ilustrados os movimentos sem a inversão, considerando o depósito e quatro cidades de entrega; a FIGURA 16 (a) ilustra a rota inicial, saindo do depósito e passando pelas cidades 1, 2, 3, e 4; a FIGURA 16 (b) ilustra as possíveis trocas; e, a FIGURA 16 (c) o resultado dessas trocas.

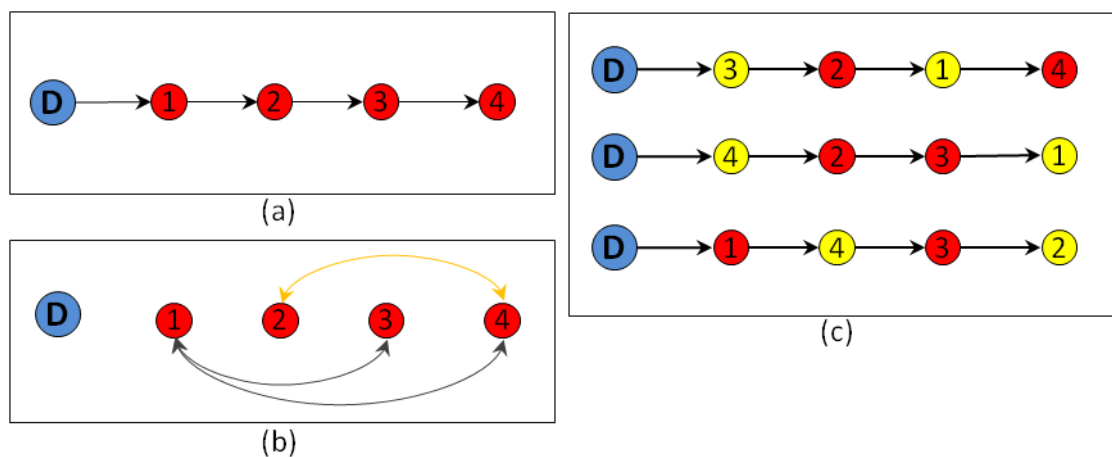


FIGURA 16 - ILUSTRAÇÃO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE BUSCA LOCAL MUDAR ATENDIMENTO DA CIDADE DE DEMANDA
FONTE: O autor (2013).

A FIGURA 17 mostra os possíveis movimentos da troca de cidades com inversão em uma rota com cinco cidades; a FIGURA 17 (a) representa a rota inicial, saindo do depósito e passando pelas cidades 1, 2, 3, 4 e 5; a FIGURA 17 (b) ilustra as possíveis trocas com inversão das cidades internas; e, a FIGURA 17 (c) ilustra as rotas resultantes das trocas.

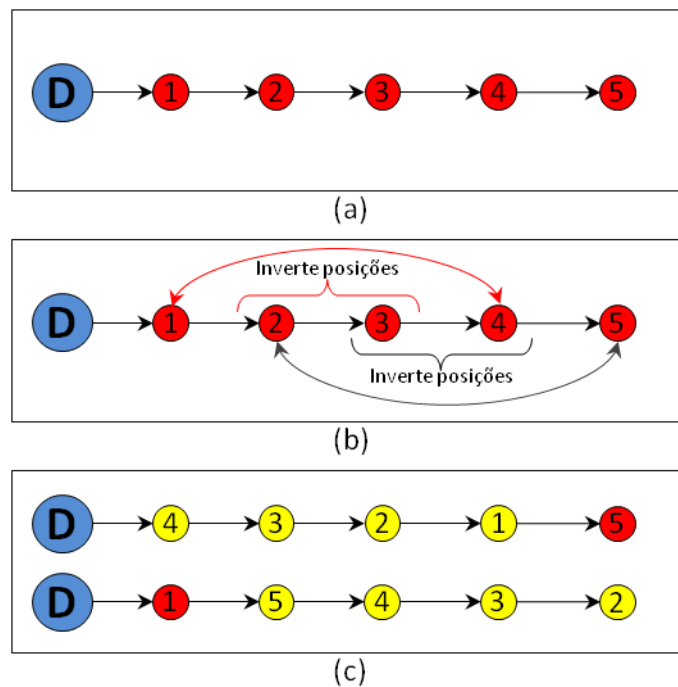


FIGURA 17 - ILUSTRAÇÃO DA APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE BUSCA LOCAL TROCAR ATENDIMENTOS COM INVERSÃO
FONTE: O autor (2013).

Os algoritmos de melhoria são aplicados em cada rota logo após sua elaboração. Os movimentos de cada método são memorizados para não serem refeitos. Sempre que há melhoria na rota, os Algoritmos de Melhoria são aplicados novamente.

3.4 PROCEDIMENTOS

Os algoritmos selecionados para efetuar a construção das rotas têm a função de selecionar quais cidades serão visitadas e em qual ponto da rota essas cidades serão inseridas, enquanto os algoritmos de melhoria serão aplicados nessas

soluções para encontrar o menor custo de deslocamento entre as cidades selecionadas.

Além disso, foram estabelecidos alguns procedimentos que, com base nas especificidades e características do trabalho da Empresa, são considerados no método desenvolvido, e conduzem às soluções mais adequadas, definindo critérios e cenários, pré e pós-definição das cargas. Com isso as informações são acessadas de forma correta, gerando propostas de rotas que, além de resultar em menores custos no frete, também resultam no melhor atendimento aos clientes com relação à redução do atraso nas entregas.

Desta forma, os dados dos pedidos são armazenados, através da importação da matriz de dados e acessados pelo programa à medida que são desenvolvidas as soluções parciais, soluções essas que se referem aos atendimentos de entrega em um dos dias de trabalho da Empresa. Desse modo, o conjunto das soluções parciais gera a solução final, referente ao atendimento de todos os pedidos do período.

Em cada data, sendo dia útil ou não, as rotas dos veículos que estão em atendimento são atualizadas, através da redução da distância que o veículo percorreu, ou seja, é debitada da distância que o veículo está percorrendo, a quantia de 500 quilômetros. A base de dados de veículos é atualizada, verificando quantos veículos retornaram da última rota definida, informando quantas cargas podem ser consolidadas na próxima solução parcial.

Antes de dar início à construção das rotas são verificadas as datas dos pedidos. Os pedidos que estão em atraso são inseridos na rota com prioridade.

A seguir são iniciadas as construções das rotas, selecionando a cidade que fará parte da rota e adicionando à carga, os pedidos dos clientes localizados nessa cidade. Para a construção das rotas é utilizado um algoritmo de construção, porém, antes de sua efetiva utilização, são verificadas as datas de entrega definidas a cada pedido para averiguar possíveis atrasos. Na hipótese de ser detectado atraso em algum pedido, a rota é iniciada com a cidade do cliente desse pedido, o qual é selecionado para compor a carga. Caso existam outras demandas na mesma cidade, essas serão atendidas pelo mesmo veículo, e então, o restante da carga é consolidada através da formação da rota pelo algoritmo de construção. Definida cada uma das rotas, são aplicados os algoritmos de melhoria.

Depois de formada a solução parcial, são verificadas as possíveis economias para enviar os pedidos que estão programados nas cargas, por meio da utilização

das transportadoras terceirizadas. Quando a economia é constatada, o pedido é retirado da carga. Se o pedido está no limite de seu prazo de entrega, ele é enviado pela transportadora, caso contrário é armazenado para verificação futura de remessa em outra carga.

Quando ocorre a retirada de algum pedido de uma das cargas, a elaboração da solução parcial é refeita.

3.5 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Os algoritmos e procedimentos apresentados foram programados utilizando a linguagem computacional *Visual Basic*, versão 6.0.

A cada execução do programa é selecionada a heurística a ser utilizada para a construção das rotas e os parâmetros relativos a cada uma delas, relacionados aos experimentos definidos na seção 3.3.

O método programado percorrerá todas as datas do período de estudo, estabelecendo as soluções parciais e atualizando os dados para aplicação no próximo período. Assim, cada execução do programa apresentará a solução total relativa aos experimentos. Os resultados são apresentados no capítulo 5.

No QUADRO 5 é apresentado o pseudocódigo para a definição de cada carga, pelo qual é efetuado o roteamento do veículo e a consolidação da carga, onde:

- i representa o pedido selecionado;
- P_{total} é o peso total dos produtos alocados na carga;
- V_{total} é o volume total dos produtos alocados na carga;
- P_i é o peso do produto do pedido selecionado;
- V_i é o volume do produto do pedido selecionado;
- P_{max} é a capacidade de peso do veículo;
- V_{max} é a capacidade de volume do veículo;
- P_{min} é o peso mínimo de carga para enviar o veículo;
- V_{min} é o volume mínimo de carga para enviar o veículo.

<p>PASSO 1: Selecionar veículo. Definir: V_{\max}, P_{\min}, V_{\max}, V_{\min}</p> <p>PASSO 2: Verificar possíveis atrasos de entrega; Se houver pedido com possibilidade de atraso, fazer: Adicionar pedido à carga, selecionar cidade para compor a rota; Caso contrário, selecionar cidade pela heurística.</p> <p>PASSO 3: Repetir até formar a carga: Repetir enquanto houver pedidos a ser atendidos na cidade selecionada: Selecionar próximo pedido i: Se $P_{\text{total}} + P_i \leq P_{\max}$ e $V_{\text{total}} + V_i \leq V_{\max}$: Adicionar pedido i na carga; Selecionar a próxima cidade para compor a rota;</p> <p>PASSO 4: Se $P_{\text{total}} \geq P_{\min}$ ou $V_{\text{total}} \geq V_{\min}$; Aplicar algoritmos de melhoria na rota; Armazenar a carga nos resultados parciais; Caso contrário, descartar a carga.</p> <p>PASSO 5: FIM</p>
--

QUADRO 5 - PSEUDOCÓDIGO PARA A CONSOLIDAÇÃO DA CARGA E ROTEAMENTO DO VEÍCULO.

Ainda, na implementação do programa computacional, foram definidos alguns experimentos no que concerne à utilização do veículo de menor porte.

Como os custos para envio de uma carga com o veículo furgão é o mesmo dos veículos de maior capacidade, isso também resulta maiores custos com frete. Uma vez que a metodologia implementada, através do programa computacional, pode definir rotas mais eficientes, foram definidos experimentos para verificar a possível redução na utilização do veículo furgão.

Assim, foram testadas três possibilidades: diária - onde em cada solução parcial o veículo será utilizado; alternada - as cargas dos veículos são consolidadas em dias alternados; e semanal - o veículo poderá ser utilizado apenas uma vez em cada semana.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados de cada uma das propostas para resolução do problema abordado nesta pesquisa.

São apresentados os resultados dos experimentos avaliando os custos do frete e a quantidade total de dias de atrasos nas entregas, bem como os critérios e parâmetros adotados. A partir disso, são analisados os tempos de execução dos métodos propostos e as quantidades de cargas consolidadas para os veículos.

São avaliadas as melhores soluções geradas em cada heurística a fim de comparar os resultados do custo do frete, atrasos de entrega e quantidade de veículos remetidos, os resultados foram comparados aos obtidos pela Empresa, sendo que estes dados estão apresentados na TABELA 2.

TABELA 2 - DADOS GERAIS DAS ENTREGAS EFETUADAS PELA EMPRESA

Descrição	Quantidade
Custo total do frete (R\$)	682.519,67
Total de atrasos nas entregas (dias)	2698
Número de pedidos que sofreram atraso na entrega (unidades)	595
Cargas remetidas com veículo caminhão (unidades)	117
Cargas remetidas com veículo furgão (unidades)	33

FONTE: EMPRESA

Além do número de dias de atraso na entrega, foram analisados ainda, os atrasos por pedido. A relação de atraso de entrega nos pedidos, efetuados pela Empresa estão relacionados no ANEXO 1.

4.1 ANÁLISES INICIAIS

Antes de realizar os experimentos propostos e implantar as heurísticas de construção das rotas, foram efetuados alguns testes com o propósito de definir quais procedimentos e métodos resultariam em melhores soluções quando utilizados em conjunto com as heurísticas.

Também, nesses testes, foi verificada qual forma de utilização do furgão resultou em melhores soluções. Essas análises são apresentadas na seção 4.1.2.

4.1.1 Análise dos algoritmos de melhoria e procedimentos definidos às heurísticas

Para o algoritmo do Vizinho Mais Próximo e *GRASP* foram efetuados testes para verificação da eficácia dos Algoritmos e Melhoria e do procedimento descrito na seção 3.3.1.1. A utilização conjunta dos métodos resultou em redução média de 7,77% nos custos do frete para a primeira heurística e 10,65% para a segunda.

A TABELA 3 apresenta os percentuais médios de redução nos custos do frete das soluções, com a utilização dos métodos em relação aos valores da solução gerada apenas pela heurística de construção. A primeira e a segunda colunas identificam a utilização ou não dos métodos e as demais, os percentuais médios de redução do custo do frete. As comparações dos resultados obtidos nos testes estão relacionadas nos APÊNDICES B e E.

TABELA 3 - PERCENTUAIS DE REDUÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DOS ALGORITMOS DE MELHORIA E PROCEDIMENTO

Algoritmo de Melhoria	Procedimento seção 3.3.1.1	Percentual médio de redução	
		Vizinho Mais Próximo	<i>GRASP</i>
-	Sim	4,39%	4,32%
Sim	-	4,98%	7,81%
Sim	Sim	7,77%	10,65%

FONTE: O autor (2013).

Para a Heurística de *Clarke* e *Wright* foram efetuados experimentos com alguns valores do parâmetro modelador para verificar da eficácia dos algoritmos de melhoria. Foram obtidos resultados com redução média nos custos do frete de 2,69%. Na TABELA 4 constam os percentuais de redução obtidos com a utilização de cada parâmetro. Os valores do frete das soluções com os quais foram efetuadas as comparações estão relacionados no APÊNDICE H.

TABELA 4 - PERCENTUAIS DE REDUÇÃO NO VALOR DO FRETE COM A UTILIZAÇÃO DOS ALGORITMOS DE MELHORIA NAS SOLUÇÕES DA HEURÍSTICA DE *CLARKE* E *WRIGHT*

	Parâmetro Modelador λ :							Média
	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	
Percentuais de redução	7,50%	0,81%	4,26%	1,81%	0,45%	2,88%	1,09%	2,69%

FONTE: O autor (2013).

A Heurística de *Mole* e *Jameson*, também apresentou redução nos custos do frete nas soluções geradas com a heurística utilizando os algoritmos de melhoria em relação às soluções geradas apenas com a heurística, com percentual médio de 5,29%. Quanto ao filtro que seleciona apenas as cidades de determinadas regiões de atendimentos, descrito na seção 3.3.4.1, definido a heurística de *Mole* e *Jameson* para reduzir o número de cálculos efetuado por ela, ocorreu redução média de 0,8% nos custos do frete. Já as soluções com a utilização conjunta dos dois métodos resultaram em redução média de 6,79%. Os resultados dos custos do frete desses testes e os percentuais de redução constam nos APÊNDICES J e K.

A FIGURA 18 (a) ilustra três rotas formadas com a utilização do Algoritmo do Vizinho Mais Próximo em uma das soluções parciais, já a FIGURA 18 (b) ilustra as rotas resultantes após a utilização dos Algoritmos de Melhoria, aplicados sobre as rotas do resultado do Algoritmo do Vizinho Mais Próximo.

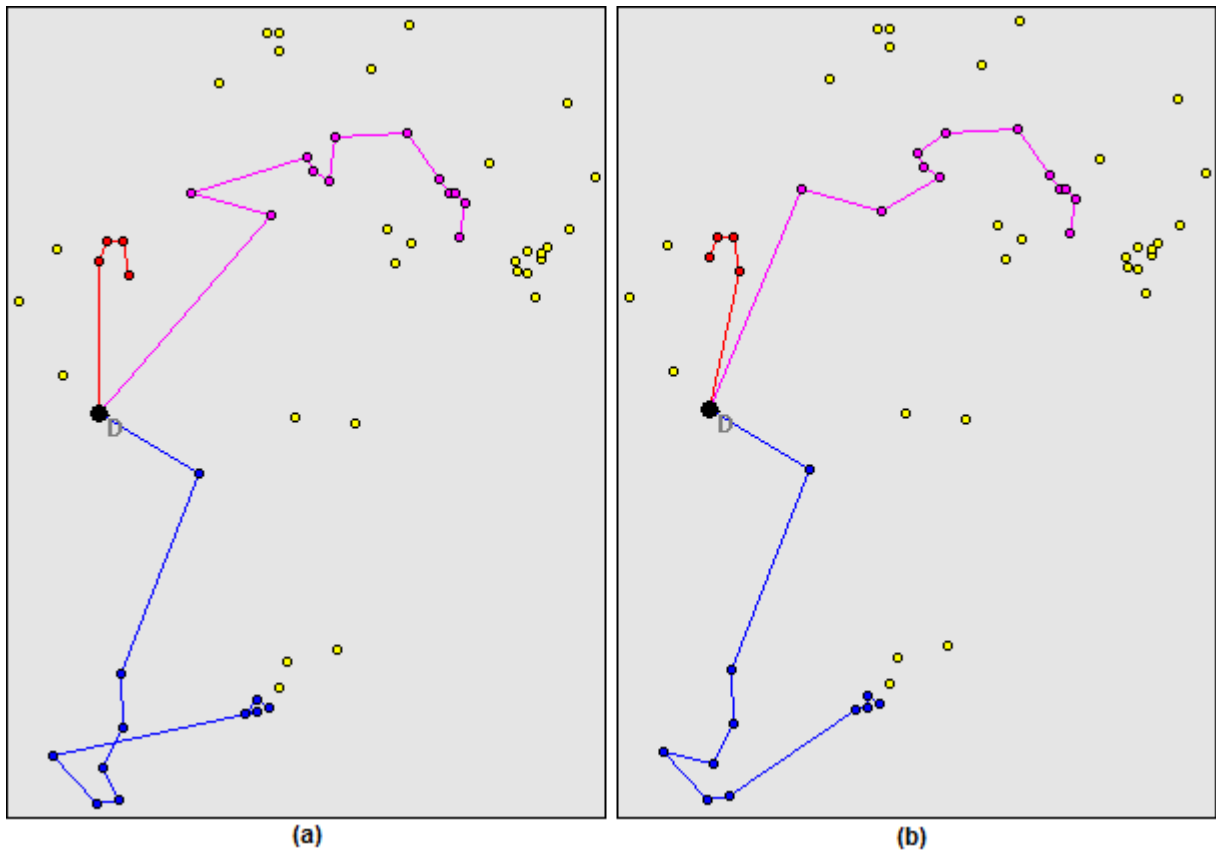


FIGURA 18 - ROTAS FORMADAS PELO ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO, COMPARANDO A APLICAÇÃO DOS ALGORITMOS DE MELHORIA NA SOLUÇÃO PARCIAL.
FONTE: O autor (2013).

A aplicação dos algoritmos de melhoria resultou em expressiva redução nos custos do frete em relação às soluções geradas pelas heurísticas de construção de rotas, fato que justifica sua utilização. Também é verificada a redução com a utilização do procedimento definido na seção 3.3.1.1, estabelecido para o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo e *GRASP*, assim como no filtro implementado para a Heurística de *Mole* e *Jameson*.

4.1.2 Avaliação das formas de utilização do furgão

A forma de utilização do furgão foi testada em conjunto com os experimentos descritos na seção anterior. Para as quatro heurísticas abordadas, os resultados são idênticos nas soluções geradas nas formas diária e alternada. Esses valores são resultados das demais restrições e parâmetros estabelecidos, que resultaram na formação de rotas com cargas mais eficientes para os veículos de maior porte.

Já ao comparar a utilização do furgão nas formas diária e semanal, a segunda opção apresentou melhores resultados. Na TABELA 5 estão relacionados os percentuais médios de redução do custo do frete entre as duas formas de utilização, para cada heurística. As relações completas dos percentuais de redução dos custos do frete das soluções dos experimentos estão nos APÊNDICES C, F, I e L.

TABELA 5 - PERCENTUAL DE REDUÇÃO NOS CUSTOS DO FRETE COM UTILIZAÇÃO DO FURGÃO NA FORMA SEMANAL EM RELAÇÃO ÀS DEMAIS FORMAS.

Heurística	Percentual de redução
Vizinho Mais Próximo	1,66%
<i>GRASP</i>	1,48%
<i>Clarke e Wright</i>	2,41%
<i>Mole e Jameson</i>	1,75%
Média	1,83%

FONTE: O autor (2013).

4.2 RESULTADOS COM A UTILIZAÇÃO DO ALGORITMO VIZINHO MAIS PRÓXIMO

Os resultados do experimento com o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo estão relacionados na TABELA 6, onde constam os custos do frete, quantidade de dias de atraso de entrega e de cargas consolidadas, bem como, os respectivos percentuais de redução em relação ao trabalho realizado pela Empresa.

TABELA 6 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DO ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO

Custos do frete		Atrasos de entrega		Cargas Consolidadas			
				Caminhão		Furgão	
Valor	%	Quant. Dias	%	Quant.	%	Quant.	%
609.372,18	10,72%	622	77%	115	1,70%	2	93,90%

FONTE: O autor (2013).

As quantidades de dias de atrasos de entrega nos pedidos estão relacionadas na TABELA 7.

TABELA 7 - DIAS DE ATRASOS DE ENTREGA NOS PEDIDOS NA SOLUÇÃO DO ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO

Dias de atrasos	Quantidade de pedidos com atraso
1	68
2	17
3	38
4	35
5	21
6	2
7	2
8	1
10	1
14	1
15	1
22	4
Maior atraso	22
Pedidos com atraso	191

FONTE: O AUTOR 2013.

Analisando os dados acima, constata-se que houve melhoria em relação aos dias de atraso de entrega dos pedidos. Porém, ainda ocorrem atrasos elevados, com vinte e dois dias de atraso em alguns pedidos.

O tempo de execução da heurística para gerar a solução total foi de 5min15s, e para a solução parcial, foi de apenas 6s.

A FIGURA 19 ilustra três rotas formadas com a utilização do Algoritmo do Vizinho Mais Próximo onde os pontos sem ligação, são as cidades com demanda, que não foram atendidas nesta solução parcial e que serão atendidas nas próximas datas.

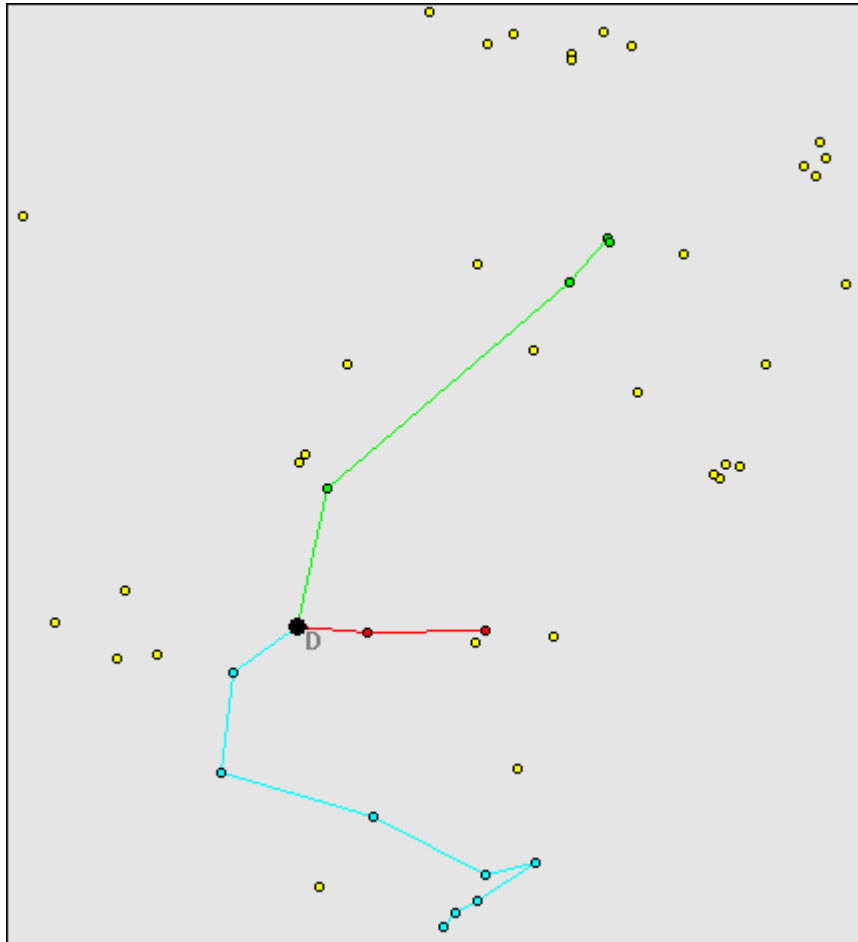


FIGURA 19 - ROTAS FORMADAS PELO ALGORITMO DO VIZINHO MAIS PRÓXIMO.

FONTE: O autor 2013.

4.3 RESULTADOS COM A UTILIZAÇÃO DA HEURÍSTICA *GRASP*

Os resultados do valor do frete dos experimentos da heurística *GRASP* estão relacionados na TABELA 8 e a quantidade de dias de atrasos de entrega na TABELA 9, nas quais a primeira coluna identifica o número de iterações das soluções relacionadas na linha que contém os resultados para cada Lista Restrita de Candidatas, bem como os respectivos percentuais de redução em relação aos valores da Empresa.

TABELA 8 - RESULTADOS DO VALOR DO FRETE DAS SOLUÇÕES GERADAS PELA HEURÍSTICA GRASP

Iterações	Lista Restrita de Candidatas <i>n</i> :							
	2		3		4		5	
	Valor	%	Valor	%	Valor	%	Valor	%
5	635.055,87	6,95%	640.634,20	6,14%	667.936,44	2,14%	715.081,65	-4,77%
10	633.238,33	7,22%	643.205,68	5,76%	665.452,94	2,50%	668.039,69	2,12%
15	629.552,41	7,76%	640.546,52	6,15%	664.833,50	2,59%	668.237,67	2,09%
20	627.849,32	8,01%	638.828,70	6,40%	663.307,89	2,81%	668.039,69	2,12%
25	627.030,53	8,13%	632.123,21	7,38%	662.446,71	2,94%	665.838,66	2,44%
30	624.407,35	8,51%	630.127,31	7,68%	662.997,22	2,86%	661.815,57	3,03%
40	622.213,31	8,84%	629.356,32	7,79%	648.091,12	5,04%	650.354,51	4,71%
50	619.845,35	9,18%	626.356,45	8,23%	643.598,97	5,70%	650.726,48	4,66%
75	617.082,96	9,59%	625.567,13	8,34%	642.186,16	5,91%	651.967,21	4,48%
100	612.273,40	10,29%	622.086,08	8,85%	633.944,88	7,12%	650.871,62	4,64%
150	608.471,30	10,85%	613.432,30	10,12%	626.303,97	8,24%	652.434,07	4,41%
200	601.431,76	11,88%	610.054,94	10,62%	616.814,48	9,63%	651.349,75	4,57%

FONTE: O autor (2013).

TABELA 9 - RESULTADOS DAS QUANTIDADES DE DIAS DE ATRASOS DE ENTREGA DAS SOLUÇÕES GERADAS PELA HEURÍSTICA GRASP

Iterações	Lista Restrita de Candidatas <i>n</i> :							
	2		3		4		5	
	Quantidade	%	Quantidade	%	Quantidade	%	Quantidade	%
5	509	81,13%	583	78,39%	647	76,02%	766	71,61%
10	503	81,36%	554	79,47%	604	77,61%	608	77,46%
15	496	81,62%	642	76,20%	635	76,46%	635	76,46%
20	510	81,10%	554	79,47%	627	76,76%	725	73,13%
25	505	81,28%	519	80,76%	620	77,02%	932	65,46%
30	489	81,88%	521	80,69%	629	76,69%	740	72,57%
40	495	81,65%	511	81,06%	624	76,87%	719	73,35%
50	499	81,50%	492	81,76%	599	77,80%	758	71,91%
75	673	75,06%	510	81,10%	603	77,65%	672	75,09%
100	655	75,72%	495	81,65%	567	78,98%	680	74,80%
150	532	80,28%	494	81,69%	544	79,84%	662	75,46%
200	516	80,87%	509	81,13%	514	80,95%	654	75,76%

FONTE: O autor (2013).

Os melhores resultados obtidos nos experimentos com a Heurística GRASP são observados com a utilização da Lista Restrita com apenas duas cidades, obtendo percentuais de redução de até 11,88% nos custos do frete. Com relação aos atrasos, ocorreu redução em todos os experimentos, com resultados até 81,88% menores do que no trabalho realizado pela Empresa.

Na TABELA 10 estão relacionados os atrasos de entrega nos pedidos das soluções que apresentaram melhores resultados. A primeira coluna identifica a

quantidade de dias de atraso nos pedidos; nas demais constam as quantidades de pedidos que sofreram esse atraso para as soluções construídas pela heurística com a LRC e quantidade de iterações identificadas na primeira e segunda linha. Nas últimas linhas estão descritos o maior atraso de entrega e o número total de pedidos que sofreram atraso nas soluções.

TABELA 10 - QUANTIDADE DE DIAS ATRASOS DE ENTREGA NOS PEDIDOS, MELHORES SOLUÇÕES DO GRASP

Dias de atrasos	LRC = 2; Iterações:								LRC = 3; Iterações:							
	25	30	40	50	75	100	150	200	25	30	40	50	75	100	150	200
1	68	71	68	71	71	80	69	85	54	60	65	75	59	67	78	85
2	22	15	9	24	28	37	25	35	36	46	19	37	34	34	36	35
3	29	30	32	25	31	33	17	20	23	21	17	32	31	25	33	25
4	15	14	22	19	21	20	34	22	34	19	17	15	14	16	12	19
5	15	17	11	10	15	15	7	12	10	13	10	7	6	4	6	10
6	2	4	7	3	7	7	5	8	2	6	7	9	7	5	8	5
7	2	1	2	2	6			2	8	5	4	3	4	8	3	2
8	2			1	3	1	2			1	4		3		1	4
9		2	1	1		1						1	1	1		3
10	3		1	1	3	2	2	2	1	1	1			2		
12			1	1	2		2	3		1				1	1	1
14	1		1			2					1	2	1			
15	1				1		1	1			3	1			2	
16		3		1	2				1							1
18		1	1		1	1			1		1				1	
20		1					1	1					2			
21				1	2					1						
22	2	1	1	1		3					1			1		1
25					1	1	1					1				
26	1			1					1					2		
29			1													
31						1										
Maior Atraso	26	22	29	26	25	31	25	20	26	21	22	25	20	26	18	22
Pedidos com atraso	163	160	158	162	194	204	166	191	171	174	150	183	162	166	181	191

FONTE: O autor (2013).

Analisando os dados da tabela acima, foi possível verificar que a heurística *GRASP*, assim como o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo, resultaram em atrasos consideráveis para determinados pedidos, não se mostrando eficientes para a solução do problema. Os tempos de execução da heurística, relativos às quantidades de iterações, estão descritos na TABELA 11.

TABELA 11 - TEMPO DE EXECUÇÃO DA HEURÍSTICA GRASP

Iterações	Tempo Solução Final	Tempo Solução Parcial
5	24min	27s
10	01h04min	1min10s
15	01h32min	01min41s
20	02h14min	02min27s
25	02h52min	03min08s
30	03h28min	03min47s
40	04h42min	05min08s
50	05h57min	06min30s
75	08h25min	09min11s
100	11h15min	12min17s
150	13h48min	15min04s
200	18h24min	20min05s

FONTE: O autor (2013).

Os tempos de execução mostram que a heurística não é adequada para a solução do problema em questão, uma vez que é necessário um número elevado de iterações para obter boas soluções.

A FIGURA 20 ilustra três rotas formadas em uma das soluções parciais da heurística.

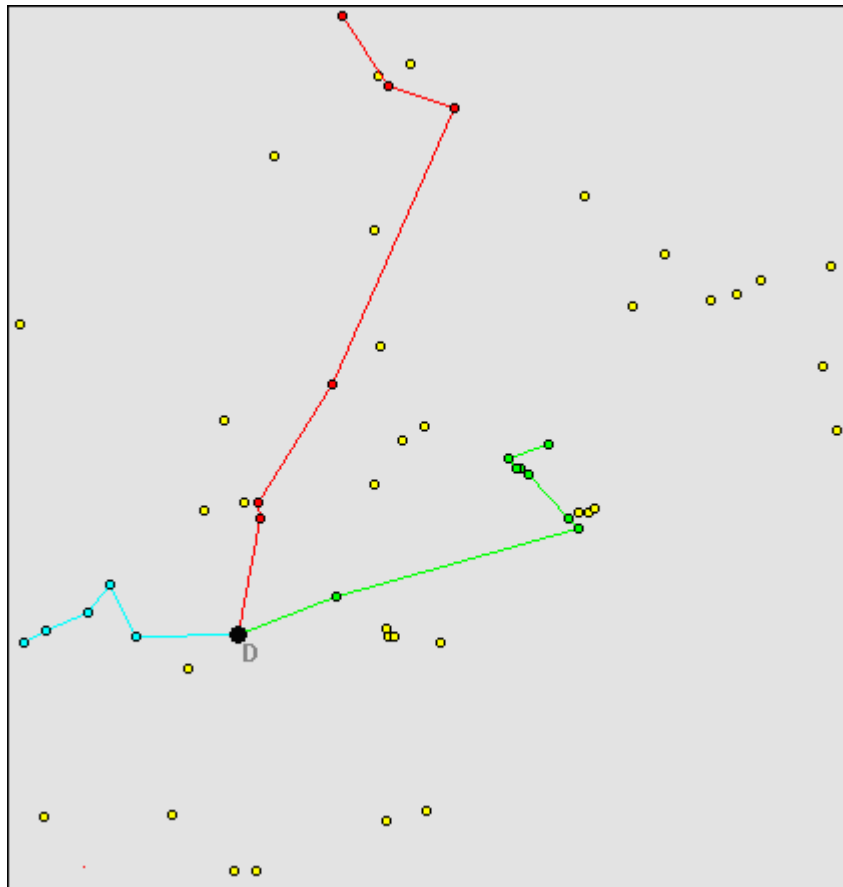


FIGURA 20 -ROTAS FORMADAS PELA HEURÍSTICA GRASP

FONTE: O autor (2013).

4.4 RESULTADOS COM A UTILIZAÇÃO DA HEURÍSTICA DE CLARKE E WRIGHT

Os resultados dos experimentos com a utilização da heurística de *Clarke* e *Wright* estão relacionados na TABELA 12. A primeira coluna identifica o parâmetro; nas demais são apresentados os resultados do custo do frete, quantidade de dias de atrasos de entrega e quantidade de cargas consolidadas, com os respectivos percentuais de redução em relação ao trabalho desenvolvido pela Empresa.

TABELA 12 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DA HEURÍSTICA DE CLARKE E WRIGHT

λ	Custos do frete		Atrasos de entrega (dias)		Cargas Consolidadas			
					Caminhão		Furgão	
	Valor	%	Quant.	%	Quant.	%	Quant.	%
0,5	887.131,25	-29,98%	1267	53,04%	106	9,40%	9	72,73%
0,6	827.154,76	-21,19%	824	69,46%	106	9,40%	7	78,79%
0,7	815.332,58	-19,46%	1074	60,19%	107	8,55%	8	75,76%
0,8	788.897,52	-15,59%	1059	60,75%	106	9,40%	7	78,79%
0,9	755.596,98	-10,71%	648	75,98%	105	10,26%	7	78,79%
1	692.824,06	-1,51%	525	80,54%	109	6,84%	7	78,79%
1,1	685.979,05	-0,51%	582	89,55%	110	5,98%	7	78,79%
1,2	655.257,22	3,99%	581	78,47%	112	4,27%	6	81,82%
1,3	649.241,91	4,88%	528	78,43%	112	4,27%	7	78,79%
1,4	634.844,41	6,99%	481	82,17%	109	6,84%	7	78,79%
1,5	616.749,35	9,64%	751	72,16%	111	5,13%	6	81,82%
1,6	615.388,51	9,84%	707	73,80%	113	3,42%	7	78,79%
1,7	602.511,65	11,72%	867	67,87%	112	4,27%	8	75,76%
1,8	588.060,85	13,84%	1550	42,55%	111	5,13%	6	81,82%
1,9	596.889,38	12,55%	1161	56,97%	111	5,13%	11	66,67%
2	576.657,39	15,51%	1741	35,47%	111	5,13%	7	78,79%
2,1	573.038,66	16,04%	1843	31,69%	107	8,55%	3	90,91%
2,2	592.832,85	13,14%	6150	-127,95%	108	7,69%	7	78,79%
2,3	585.365,02	14,23%	7004	-159,60%	110	5,98%	6	81,82%
2,4	594.195,98	12,94%	6743	-149,93%	112	4,27%	4	87,88%
2,5	619.729,56	9,20%	4628	-71,53%	113	3,42%	2	93,94%
2,6	611.828,62	10,36%	4699	-74,17%	112	4,27%	3	90,91%
2,7	619.610,14	9,22%	4694	-73,98%	114	2,56%	2	93,94%
2,8	611.649,90	10,38%	4751	-76,09%	113	3,42%	2	93,94%
2,9	622.743,28	8,76%	3838	-42,25%	115	1,71%	2	93,94%
3	625.975,15	8,28%	3109	-15,23%	111	5,13%	7	78,79%

FONTE: O autor (2013).

Por conseguinte, os GRÁFICOS 1 e 2 demonstram a variação dos resultados à medida que é alterado o parâmetro modelador λ , sabendo que no primeiro estão ilustrados os resultados dos valores do frete e no segundo a quantidade de dias de atraso nas entregas.

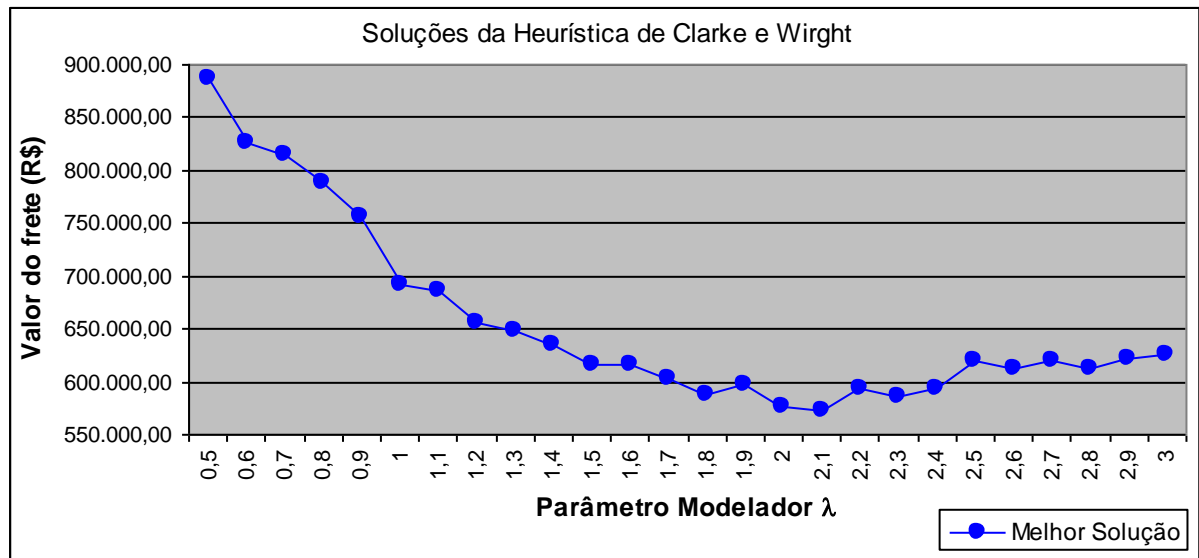


GRÁFICO 1 - RESULTADOS DO VALOR DO FRETE DAS SOLUÇÕES GERADAS PELA HEURÍSTICA DE CLARKE E WRIGHT
 FONTE: O autor (2013).

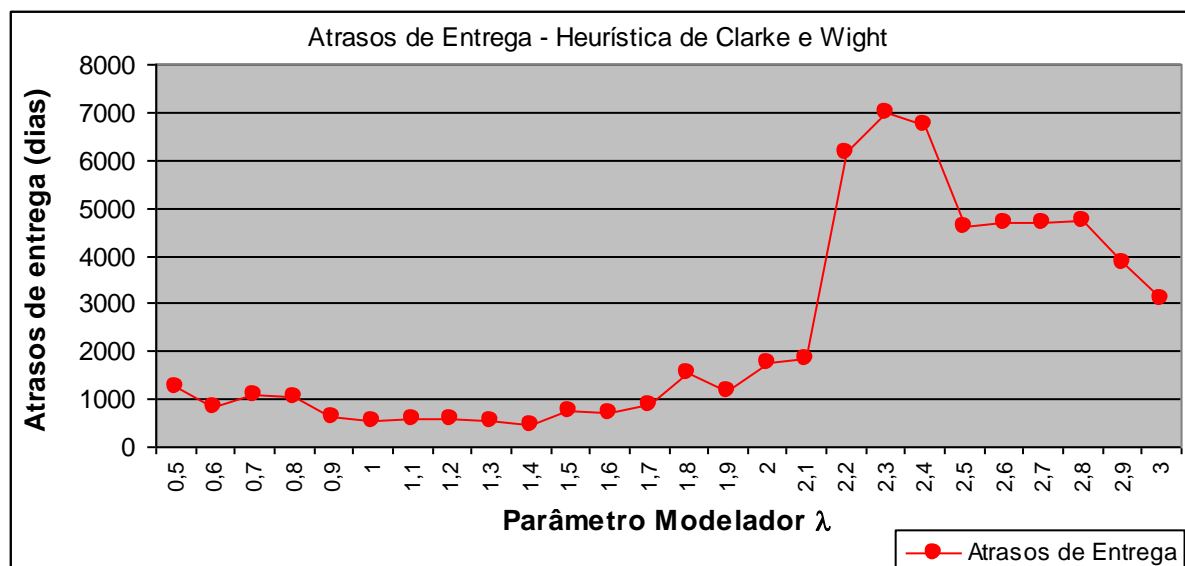


GRÁFICO 2 - RESULTADOS DAS QUANTIDADES DE DIAS DE ATRASOS DE ENTRAGA DAS SOLUÇÕES GERADAS PELA HEURÍSTICA DE CLARKE E WRIGHT
 FONTE: O autor (2013).

Analisando os gráficos acima, percebe-se que à medida que o valor do parâmetro modelador λ aumenta, ocorre a redução nos custos do frete até o valor de

$\lambda = 2,1$, a partir do qual os valores tornam a aumentar. Já nos resultados relacionados às quantidades de dias de atrasos de entrega, mostram os melhores resultados para $0,9 \leq \lambda \leq 1,7$. Entretanto, para de $\lambda \geq 1,8$, os atrasos aumentam a cada experimento, chegando a valores superiores aos que a Empresa já dispõe. A solução que apresentou menor quantidade de dias de atrasos nas entregas resultou na redução de 82,06%, com $\lambda = 1,4$.

Na TABELA 13 estão relacionadas a quantidade de dias de atraso na entrega nos pedidos, referentes às melhores soluções. A primeira coluna identifica a quantidade de dias de atraso e, nas demais, constam as quantidades de pedidos que sofreram atraso, relacionada às soluções do parâmetro modelador identificado na segunda linha. Nas últimas linhas estão descritos o maior atraso de entrega em alguns pedidos e o número total de pedidos que sofreram atraso.

TABELA 13 - DISTRIBUIÇÃO DOS ATRASOS DE ENTREGA DAS SOLUÇÕES DA HEURÍSTICA DE CLARKE E WRIGHT.

Dias de Atraso	Parâmetro Modelador λ :								
	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
1	73	79	60	56	41	35	49	37	37
2	28	22	31	17	23	8	29	8	7
3	47	30	46	23	42	31	62	29	23
4	27	40	20	19	20	20	35	26	41
5	17	19	10	8	4	7	12	7	21
6	14	6	3	7	6	8	22	8	25
7	2	2	2	5	3	15	31	16	24
8				4	5	4	16	2	11
9				5	3	1	3	2	2
10	2	1	3	5	5	3	12	7	7
11				2	2	4	9	6	1
12			1	1	1	2	5	4	2
13					3	2		1	3
14				1	3	2	3	4	2
15					2	1	2	1	3
16				2	1	2		2	
17			1		2		2		7
18				1		4	6	1	2
19									4
20								1	
21				2		1		6	2
22				2					
23						1			
25					1	1			4
26				1					1
27									1
28							1		1
29								1	1
31				2				2	
32							1		1
34								1	
36									1
37						2			
39									2
41									2
44								1	
55								1	
Maior Atraso	10	10	17	31	25	37	32	44	41
Pedidos com atraso	210	199	177	163	167	154	300	174	238

FONTE: O autor (2013).

Analisando os dados das Tabelas 12 e 13, verifica-se que as soluções geradas para os valores de λ iguais a 1,2 e 1,3, mostraram-se mais adequadas, pois geraram o maior atraso de atendimento de dez dias para apenas dois e um pedido, respectivamente, com redução nos custos do frete e na quantidade total de dias de atrasos nas entregas.

A FIGURA 21 ilustra três rotas formadas em uma das soluções parciais da heurística, em que é possível identificar uma das características das soluções geradas por ela, que é o atendimento de pontos mais distantes à origem da rota.

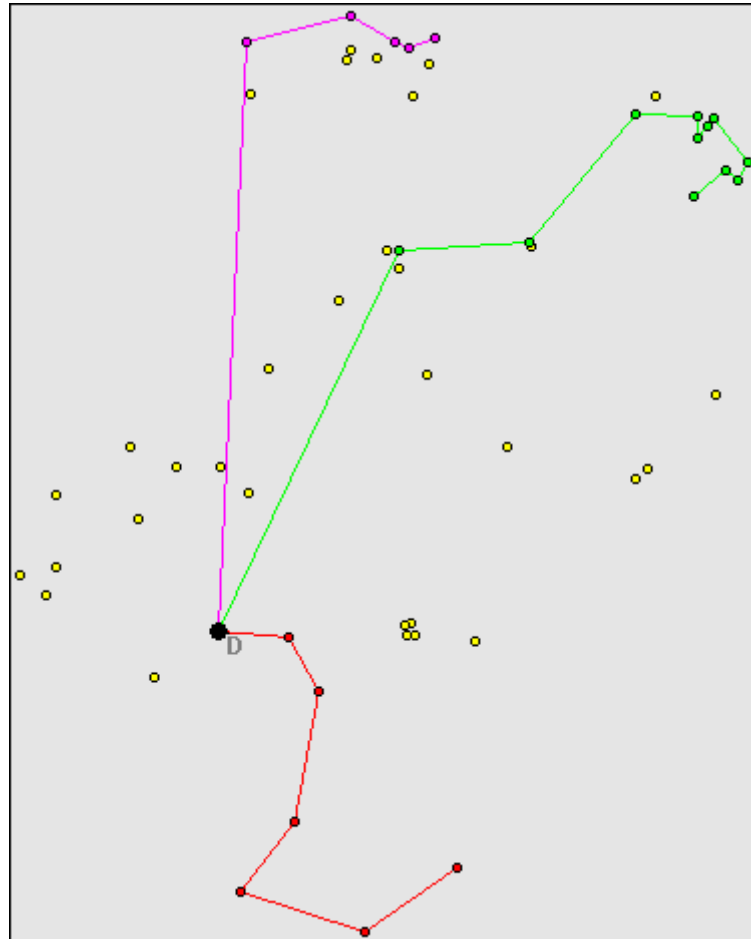


FIGURA 21 - ROTAS FORMADAS PELA HEURÍSTICA DE CLARKE E WRIGHT
 FONTE: O autor (2013).

O tempo de execução da heurística para gerar a solução total foi de 31min28s, e para a solução parcial, foi de apenas 34s.

4.5 RESULTADOS COM UTILIZAÇÃO DA HEURÍSTICA DE MOLE E JAMESON

Os resultados dos experimentos propostos para a heurística de *Mole* e *Jameson* estão relacionados na TABELA 14, onde a primeira e a segunda colunas identificam os parâmetros utilizados; nas demais são apresentados os resultados

com os respectivos percentuais de redução em relação ao trabalho desenvolvido pela Empresa.

TABELA 14 - RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DA HEURÍSTICA DE MOLE E JAMESON

Parâmetros		Custos do Frete		Dias de Atrasos de Entrega		Cargas Consolidadas			
λ	μ	Valor	%	Quant.	%	Caminhão		Furgão	
				Quant.	%	Quant.	%	Quant.	%
0	0	638.765,26	6,41%	393	85,43%	116	0,85%	2	93,94%
0	1	635.608,76	6,87%	524	80,58%	112	4,27%	3	90,91%
1	0	610.962,80	10,48%	329	87,81%	115	1,71%	1	96,97%
1	1	648.867,51	4,93%	351	86,99%	115	1,71%	1	96,97%
1,1	0,1	609.701,43	10,67%	443	83,58%	115	1,71%	3	90,91%
1,2	0,2	625.944,47	8,29%	433	83,95%	112	4,27%	5	84,85%
1,3	0,3	618.662,39	9,36%	368	86,36%	115	1,71%	4	87,88%
1,4	0,4	622.495,63	8,79%	354	86,88%	116	0,85%	4	87,88%
1,5	0,5	610.561,61	10,54%	281	89,58%	115	1,71%	3	90,91%
1,6	0,6	615.040,70	9,89%	337	87,51%	114	2,56%	4	87,88%
1,7	0,7	625.071,51	8,42%	372	86,21%	113	3,42%	3	90,91%
1,8	0,8	626.584,91	8,20%	347	87,14%	114	2,56%	3	90,91%
1,9	0,9	637.302,26	6,63%	428	84,14%	116	0,85%	0	100,00%
2	1	661.001,28	3,15%	502	81,39%	115	1,71%	1	96,97%
0	5	668.770,09	2,01%	732	72,87%	113	3,42%	2	93,94%
0	10	684.194,11	-0,25%	633	76,54%	112	4,27%	1	96,97%
0	20	687.152,00	-0,68%	643	76,17%	112	4,27%	1	96,97%
0	50	681.981,56	0,08%	551	79,58%	113	3,42%	1	96,97%
0	100	681.981,56	0,08%	551	79,58%	113	3,42%	1	96,97%
1	5	796.403,35	-16,69%	805	70,16%	105	10,26%	8	75,76%
1	10	779.865,53	-14,26%	554	79,47%	111	5,13%	3	90,91%
1	20	720.185,71	-5,52%	569	78,91%	110	5,98%	2	93,94%
1	50	707.906,38	-3,72%	527	80,47%	113	3,42%	3	90,91%
1	100	710.244,68	-4,06%	477	82,32%	113	3,42%	5	84,85%
2	1	661.001,28	3,15%	502	81,39%	115	1,71%	1	96,97%
2	5	798.210,05	-16,95%	778	71,16%	109	6,84%	6	81,82%
2	10	794.485,84	-16,40%	561	79,21%	108	7,69%	5	84,85%
2	20	734.724,91	-7,65%	705	73,87%	110	5,98%	6	81,82%
2	50	724.264,04	-6,12%	487	81,95%	112	4,27%	2	93,94%
2	100	692.875,05	-1,52%	458	83,02%	110	5,98%	4	87,88%
5	10	785.787,89	-15,13%	496	81,62%	109	6,84%	3	90,91%
5	20	719.125,36	-5,36%	759	71,87%	110	5,98%	8	75,76%
5	50	727.757,15	-6,63%	541	79,95%	114	2,56%	1	96,97%
5	100	674.405,92	1,19%	365	86,47%	112	4,27%	4	87,88%
10	10	785.787,89	-15,13%	496	81,62%	109	6,84%	3	90,91%
10	20	719.125,36	-5,36%	759	71,87%	110	5,98%	8	75,76%
10	50	727.757,15	-6,63%	541	79,95%	114	2,56%	1	96,97%
10	100	694.703,18	-1,79%	477	82,32%	109	6,84%	4	87,88%

FONTE: O autor (2013).

O GRÁFICO 3 ilustra os resultados do valor do frete dos experimentos à medida que os parâmetros são alterados e, o GRÁFICO 4 demonstra a quantidade de dias de atraso nas entregas.

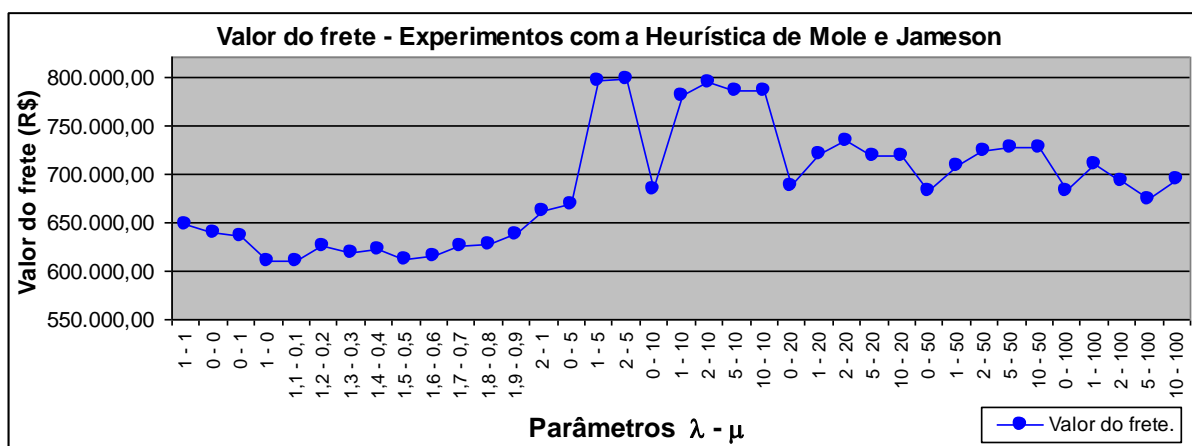


GRÁFICO 3 - RESULTADOS DO VALOR DO FRETE DAS SOLUÇÕES DA HEURÍSTICA DE MOLE E JAMESON
 FONTE: O autor (2013).

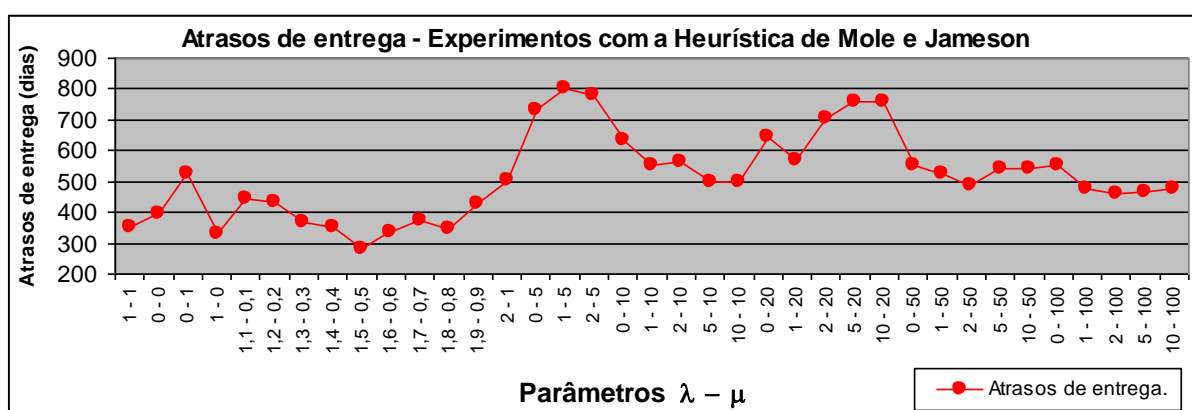


GRÁFICO 4 - QUANTIDADE DE DIAS DE ATRASOS DE ENTREGA DAS SOLUÇÕES DA HEURÍSTICA DE MOLE E JAMESON

Os melhores valores do frete foram obtidos a partir dos parâmetros estabelecidos com base no critério geral de Gaskell (1967), com $1,1 \leq \lambda \leq 1,9$ e $0,1 \leq \mu \leq 0,9$, com destaque para a solução com $\lambda = 1,5$ e $\mu = 0,5$, que apresentou a menor quantidade de dias de atrasos de entrega e um dos menores custos do frete.

Na TABELA 15 estão relacionados os dias de atrasos de entrega nos pedidos das melhores soluções. A primeira coluna identifica as quantidades de dias de atraso, nas demais colunas constam as quantidades de pedidos que sofreram esse atraso, relacionada às soluções dos parâmetros μ e λ descritos na segunda linha. Nas últimas linhas estão descritos o maior atraso de entrega e o número total de pedidos entregues fora do prazo.

TABELA 15 - ATRASOS DE ENTREGA NOS PEDIDOS DAS SOLUÇÕES DE MOLE E JAMESON.

Dias de Atraso	Parâmetros ($\mu - \lambda$)													
	0 - 0	0 - 1	1 - 0	1 - 1	1,1 - 0,1	1,2 - 0,2	1,3 - 0,3	1,4 - 0,4	1,5 - 0,5	1,6 - 0,6	1,7 - 0,7	1,8 - 0,8	1,9 - 0,9	2 - 1
1	82	76	73	87	94	52	57	77	64	70	56	47	95	66
2	20	29	24	28	33	28	28	16	30	10	32	25	17	42
3	28	34	30	29	34	44	38	26	24	46	29	39	43	54
4	26	21	13	16	18	24	24	21	10	14	27	15	27	23
5	9	15	8	9	13	8	4	13	3	8	9	11	6	6
6	4	7		2		1	3	3	5	1	2	3	3	9
7	2	3					1			1			2	2
8		3												
10		2			3									
11		2												
12			1											
14			1		1									
15						1								
18						2								
Maior Atraso	7	11	14	6	14	18	7	6	6	7	6	6	7	7
Pedidos com atraso	171	192	150	171	196	160	155	156	136	150	155	140	193	202

FONTE: O autor (2013).

Verifica-se que as soluções geradas utilizando os valores dos parâmetros $\lambda \geq 1,3$ e $\mu \geq 0,3$ mostraram-se mais eficientes, já que o maior atraso foi de sete dias para quatro experimentos e de seis dias para demais.

Considerando os valores do frete, o total de dias de atraso de entrega e os atrasos em cada pedido, a melhor solução está evidenciada para os valores de $\lambda = 1,5$ e $\mu = 0,5$, conforme dados sintetizados na TABELA 16.

TABELA 16 - MELHOR RESULTADO DA HEURÍSTICA DE MOLE E JAMESON

Frete		Atrasos de Entrega			
Valor	Percentual de Redução	Total	Percentual de Redução	Pedidos com atraso	Maior Atraso
R\$ 610.561,61	10,54%	281 Dias	89,58%	136	6 dias

FONTE: O autor (2013).

O tempo de execução da heurística para gerar a solução total foi de 45min31s sem o filtro e de 31min41s com o filtro, para a solução parcial, foram de 50s e 35s respectivamente.

4.6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Na TABELA 17 estão relacionados os melhores resultados das soluções geradas para cada heurística utilizada, onde constam o valor do frete, a quantidade total de dias de atrasos de entrega, o maior atraso em um pedido, a quantidade de pedidos com atraso e o tempo de execução das heurísticas.

TABELA 17 - SÍNTESE DOS RESULTADOS

Heurística	Parâmetro		Valor do Frete	Atrasos de entrega	Maior Atraso	Pedidos com Atraso	Tempo de execução
Vizinho Mais Próximo	-		609.372,18	622	22	191	7 s
GRASP	LRC:	Iterações					
	2	75	617.082,96	673	25	194	09min11s
	2	100	612.273,40	655	31	204	12min17s
	2	150	608.471,30	532	25	166	15min04s
	2	200	601.431,76	516	20	191	20min05s
Clarke e Wright	λ						
	1,3		649.241,91	528	10	199	34s
	1,4		634.844,41	481	17	177	34s
Mole e Jameson	μ	λ					
	1,3	0,3	618.662,39	368	7	155	35s
	1,4	0,4	622.495,63	354	6	156	35s
	1,5	0,5	610.561,61	281	6	136	35s
	1,6	0,6	615.040,70	337	7	150	35s

FONTE: O autor (2013).

As quatro heurísticas apresentaram melhores resultados no custo do frete em relação ao trabalho realizado pela Empresa, com reduções próximas a 11%, e quantidade de dias atrasos de entrega até 89% inferiores. Ocorreu também redução na quantidade de veículos remetidos, demonstrando que as cargas foram elaboradas de maneira mais eficiente.

Analisando os dados da TABELA 17, constata-se algumas restrições para utilização de algumas heurísticas de forma constante na Empresa, como no caso do *GRASP* que apresentou elevado tempo de execução.

Ainda, para o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo, mesmo apresentando o menor custo para o frete e menor tempo de execução, o total de dias de atrasos de entrega é superior aos resultados da Heurística de *Mole* e *Jameson*, e com maior atraso no atendimento de alguns pedidos, fato que também ocorre no *GRASP*.

A Heurística de *Clarke* e *Wright* apresentou quantidade de dias de atraso inferiores às duas heurísticas anteriores, porém com valores do frete e quantidade total de dias de atrasos maiores a elas.

Já a Heurística de *Mole* e *Jameson* apresentou as menores quantidades de total de dias de atrasos de entrega, com atraso máximo de atendimento ao cliente de seis dias. A utilização da heurística com parâmetros $\lambda = 1,5$ e $\mu = 0,5$ resultou a melhor solução para o problema, com pequena elevação no custo do frete em relação ao melhor resultado, porém com a menor quantidade total de dias de atrasos de entrega, menor número de pedidos com atraso e menor quantidade de atraso de atendimento aos clientes.

5 CONCLUSÃO

O objetivo principal dessa pesquisa foi elaborar uma proposta de consolidação de cargas e roteamento de veículos direcionada ao Planejamento da Programação de Produção de uma indústria de embalagens, com a finalidade de reduzir os custos do frete e melhorar a qualidade do atendimento aos clientes. Nesse sentido, a pesquisa operacional propõe ferramentas que por meio da utilização de técnicas e métodos científicos, podem determinar a melhor utilização do uso dos recursos limitados, otimizar as operações de uma empresa, e com isso, atingir objetivos esperados (ANDRADE, 2004).

Para que o método proposto apresentasse informações válidas que pudessem proporcionar decisões mais acertadas e direcionadas aos objetivos, foram necessárias investigações acerca da forma de desenvolvimento do trabalho da Empresa.

Desse modo, identificou-se a metodologia e as formas de tomada de decisão, além das características específicas tanto da empresa quanto de seus produtos, a fim de incorporar esses dados na pesquisa. Estudaram-se as restrições operacionais enfrentadas na prática e, ainda foi feita a geração de dados e parametrizações importantes ao seu desenvolvimento.

Na sequência, foram selecionadas as heurísticas para a construção das rotas, sendo elas: Algoritmo do Vizinho Mais Próximo, Heurísticas *GRASP*, de *Clarke* e *Wright* e de *Mole* e *Jameson*. Após definidos os Algoritmos de Melhoria que se mostraram eficientes quando da sua utilização com as heurísticas, foram efetuados experimentos iniciais para verificar a viabilidade de utilização dos métodos propostos, resultando em melhorias nas soluções.

Nesses experimentos, foi verificada a possibilidade de redução de utilização do veículo de menor capacidade, ficando comprovada que quanto menor sua utilização, maior economicidade nos custos do frete eram obtidos.

Por conseguinte, definido o formato de utilização da metodologia proposta, foram efetuados diversos experimentos em cada heurística, para as quais foram definiu-se parâmetros de aplicação próprios, sendo os resultados analisados individualmente.

As heurísticas evidenciaram boas soluções, apresentando redução nos custos do frete e na quantidade de dias de atrasos de entrega com melhor utilização das capacidades dos veículos, resultando também, em menores quantidades de cargas despachadas para atender a demanda de produtos.

O Algoritmo do Vizinho Mais Próximo apresentou resultado para o custo do frete com percentual de redução de 10,72% em relação ao trabalho efetuado pela Empresa, e em quantidade de dias de atraso nas entrega com percentual de redução de 77%, porém com atrasos de entrega em determinados pedidos em quantidade de até 22 dias. O Algoritmo apresenta destaque quanto ao tempo de execução, com apenas 6 s para gerar cada solução parcial.

Os experimentos com a Heurística *GRASP* também resultaram em ótimas soluções, por meio da utilização da Lista Restrita de Candidatas com apenas 2 (duas) cidades, apresentando custo do frete com redução de até 11,88% e quantidade de dias atrasos na entrega, até 81,65% inferiores. Também, como na heurística anterior, foram constados diversos dias de atraso no atendimento a alguns clientes, com quantidades acima de 20 dias. Além disso, como resultado da quantidade de iterações necessárias para atingir essas soluções, o tempo de execução torna-se relativamente alto, com até 20min, o que dificulta sua utilização de forma contínua.

Para a Heurística de *Clarke e Wright*, além da adaptação da fórmula de economias, fora utilizado em sua formulação o parâmetro modelador λ , proposto por *Gaskel* (1967) e *Yellow* (1970), que altera o comportamento da heurística. Em decorrência, foram efetuados experimentos variando o valor do parâmetro, para os quais se obteve melhores soluções com $1,2 \leq \lambda \leq 1,6$, apresentando percentuais de redução próximos 10% para o valor do frete, e de 82,17% para as quantidades de dias de atrasos na entrega. Já os atrasos de atendimento ao cliente não ultrapassou dez dias, nas soluções com $\lambda = 1,2$ e $1,3$. A Heurística de *Clarke e Wright* apresentou tempo de execução médio para a solução parcial de 34s, indicador mais elevado em relação à primeira heurística, porém ainda adequado à utilização constante.

Finalmente, nos experimentos com a utilização da Heurística de *Mole e Jameson*, com valores para os parâmetros λ e μ descritos por Goldbarg e Luna (2005), foi evidenciado excelente resultado para $\lambda = 1,5$ e $\mu = 0,5$, com percentuais

de redução no custo do frete em torno de 10,54%, com maior destaque a redução na quantidade de dias de atrasos na entrega em torno de 89% e com atrasos de atendimento aos pedidos, não superiores a seis dias, e ainda, com menor número de pedidos com atraso. É importante ressaltar que essa heurística normalmente apresenta tempos de execução superiores à de *Clarke* e *Wright*, porém com a utilização do filtro estabelecido em sua implementação, o tempo de execução de ambas heurísticas foram muito próximo.

Verificou-se ainda, menor quantidade de cargas consolidadas, em todos os experimentos realizados, comprovando que a metodologia adotada proporcionou melhor aproveitamento da capacidade dos veículos nas soluções geradas pelas quatro heurísticas.

Contudo, mesmo com um grande número de experimentos, explorando todo o potencial das heurísticas, não se obteve eliminação total dos atrasos nas entregas. Fator como esse ocorre devido às falhas no planejamento, ao efetuar o compromisso com os clientes com prazos inexecutáveis, sem observar a capacidade limitada dos recursos que a empresa dispõe, quer seja de produção, quer seja de logística, comprometendo a plena qualidade do atendimento.

Considerando todas as interações apresentadas no transcorrer do trabalho, os resultados apresentados permitem concluir que o método proposto foi elaborado de forma adequada ao problema, bem como às suas características. Assim, fora possível que as heurísticas selecionadas apresentassem soluções com reduções significativas em relação ao processo atual, após explorar o universo de soluções geradas a partir das parametrizações, buscando aproveitar as melhores características de cada uma.

Nota-se, portanto, que a proposição de métodos de solução eficiente, com a utilização de heurísticas de construção de rotas, é bastante dependente do contexto e requer o ajuste fino de parâmetros de processamento caso a caso, conforme já apontando por Laport *et al.* (2000).

Fica comprovado que a utilização do método aqui proposto pode ser uma importante ferramenta ao auxílio das tomadas de decisão, prestando informações precisas para direcionar a um Planejamento da Programação de Produção mais adequado, voltado à redução de custos de entrega, proporcionando melhor aproveitamento das capacidades dos veículos e menor deslocamento.

A melhor solução apresentou elevada redução na quantidade de dias de atrasos nas entregas. Com dados mais precisos, apresentados pela ferramenta, a Empresa poderá reduzir ou até mesmo, eliminar por completo esses atrasos, utilizando-se dessas informações para definir prazos corretos de atendimento aos clientes.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa realizada, por apresentar uma metodologia eficaz ao direcionamento do Planejamento da Programação de Produção da Empresa, além dos objetivos e metodologias abordados durante o seu desenvolvimento, proporciona a reflexão para diversas abordagens diferenciadas e realização de trabalhos acadêmicos discrepantes.

Entre essas abordagens, pode ser citada, a utilização de outras heurísticas, como os Algoritmos Genéticos ou *Simulated Annealing*, que têm sido muito utilizados nas pesquisas recentes, apresentando bons resultados.

Além disso, o planejamento de rotas mais eficientes, como fora observado nas soluções, pode resultar em maiores reduções ao se efetuarem experimentos, com veículos de maior capacidade, já que pode ser vencida a dificuldade das consolidação de cargas com elevado número de pedidos a serem atendidos.

Finalmente, podem ser aliados ao método implementado, outros pontos que envolvem a programação de produção da empresa, considerando além das rotas em formação, os momentos que os produtos poderão ser atendidos na linha de produção, aliando a otimização da linha de produção à consolidação das cargas. Assim, conclui-se que o campo de pesquisa não se esgota, há sempre outras formas de se observar um mesmo objeto de estudo, podendo chegar a resultados cada vez melhores e mais avançados.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa Operacional – Métodos e Modelos de Análise de Decisões**. 3ª ed. Rio de Janeiro - RJ, LTC Editora, 2004.

BODIN, L. et al. ***Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art***. Computers and Operations Research, v. 10, p. 69–211, 1983.

CAMPOS, G. G.; YOSHIAZAKI, H. T. Y. **Algoritmos Genéticos e Computação Paralela para Problemas de roteirização de Veículos com Janelas de Tempo e Entregas Fracionadas**. Gestão & Produção, São Carlos v.13, n.2, p.271-281, maio-ago 2006.

CARVALHO, J. D. A. **Textos Sobre Gestão Industrial: Planejamento e Controle da Produção**. Guimarães – Portugal, 2000. Disponível em http://pessoais.dps.uminho.pt/jdac/apontamentos/Cap02_SisPPC.pdf, acessado em 10 de maio de 2012.

CLARKE, G.; WRIGHT, J. ***Scheduling of vehicles from central depot to a number of delivery points***. Operations Research, v. 12, p 568-581, 1964.

CORDEAU J. T. et al. ***A Guide to Vehicle Routing Heuristics***. The Journal of the Operational Research Society, Vol. 53, No. 5 (May, 2002), pp. 512-522, 2002.

COVER, T.; P. HART. ***Nearest neighbor pattern classification***. IEEE Transactions on Information Theory IT-13(1), 21–27. Reprinted in Pattern Recognition, Chinese University Press, Hong Kong, 1980. ed. By K.S. Fu, 1967.

CUNHA, C. B. **Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais**. Rio de Janeiro: Transportes, v. 8, n. 2 p. 51-74, 2000.

CUNHA, C. B., BONASSER, U. O. ABRAHÃO F. T. M. **Experimentos computacionais com heurísticas de melhorias para o problema do caixeiro viajante**. Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Natal-RN, v. 2, p. 105-117. 2002

DUMITRESCU, I.; STÜTZLE, T.A. ***A survey of methods that combine local search and exact algorithms***. Technal Report AIDA 03-07, FG INTELLEKTIK, FB Informatik, TU Darmstadt, Germany, 2003, Submit to EJOR.

FAULIN, *et al.* **Optimization of road freight transportation in Spain taking into account environmental criteria.** Primer Congreso de Logística y Gestión de la Cadena de Suministro Zaragoza, 2007.

FEO, T. A.; RESENDE M. G. C. ***Greedy randomized adaptive search procedures.*** Journal of Global Optimization 6: 109-133, 1995.

FERNANDES, C. R. **Aplicação da metaheurística GRASP na programação de caminhões para o transporte de aves domésticas.** Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba, Métodos Numéricos em Engenharia, 2005.

FREDDO, A. R.; BRITO, R.C.; **Implementação da Metaheurística GRASP para o problema do Caixeiro Viajante Simétrico.** 2008. Disponível em: <<http://www.inf.ufpr.br/aurora/disciplinas/topicosia2/downloads/trabalhos/GraspTSP.pdf>>. Acessado em 07/06/2012.

GASKELL, T. J. ***Bases for vehicle fleet scheduling.*** Operational Research, n.18, p. 281-295. 1967

GIACON, E.; MESQUITA M. A. ***Levantamento das práticas de programação detalhada da produção: um survey na indústria paulista.*** Gestão & Produção, São Carlos, v. 18, n. 3, p. 487-498, 2011.

GOLDBARG, M.; LUNA, H. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos.** 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

GOLDEN, B. *et al.* **The fleet size and mix vehicle routing problem.** Computer & Operations Research, v. 11, n.1, p. 49-66, jan 1984. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0305054884900078>.

HEINEN, M. R; OSÓRIO F. S. **Algoritmos Genéticos Aplicados ao Problema de Roteamento de Veículos.** Hífen Vol. 30, N. 58, 2006. Disponível em <http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/hifen/article/viewFile/3781/2893>, Acessado em 27 de julho de 2012.

HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. ***Factory physics: foundations of manufacturing management.*** 2th ed. Chicago: Irwin/McGraw-Hill, 2000.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões**. 2 ed. Rio de Janeiro – RJ, Elsevier, 2004.

LIN. S.; KERNIGHAN, B. W. **An effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem**. Operations Research, (1971) n. 21, p 498-516, 1971.

MEDEIROS, E. S. et al. **Pesquisa Operacional**. 3ª ed. São Paulo - SP, Atlas, 1998.

MOLE, R. H. AND JAMESON, R. S. **A sequential routing-building algorithm employing a generalised savings criterion**. *Op. Res Q*, 27: p.503–512. 1967.

MURTY, KATTA G. **Linear and combinatorial programing**. Ed. Robert E. Krieger Publish Company, Florida, USA, 1985.

PELIZARO, C. **Avaliação de desempenho do algoritmo de um programa comercial para roteirização de veículos**. Dissertação de Mestrado, São Carlos, 2000.

QUEIROZ, M. A. V. **Problema de roteirização de veículos com janelas de atendimento, frotas heterogêneas e entregas fracionadas**. Dissertação de Mestrado, UEL, Londrina, 2012.

QUINTIERI, F. L. **Algoritmos para problemas reais de roteamento de veículos: uma análise comparativa**. Dissertação de Mestrado, UFF, Niterói – 2005.

REEVES, C. R. **Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems**. John Wiley & Sons. Inc. New York – NY, 1993.

RODRIGUES, S. B. **A Metaheurística Colônia de Formigas aplicada a um problema de roteamento de veículos: caso da Itaipu Binacional**. Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba, Métodos Numéricos em Engenharia, 2007.

SANTOS, D. A. **Análise comparativa das heurísticas de um software de roteirização por intermédio de parâmetros de produtividade: aplicação em uma empresa distribuidora de bebidas**. Dissertação de Mestrado, UFF, Niterói, ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2007.

SOLOMON, M. M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problem with time windows constraints. Operations Research, v. 35, n. 2, p. 254-265, 1987.

STUTZLE, T.; DORIGO, M. ***The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications, and Advances***. Technical Report IRIDIA-2000-32, 2000.

TUBINO, D. F. **Manual de planejamento e controle da produção**. São Paulo: Atlas, 2000.

VÍVOLO, E. **2012: Ano Perdido?** Editorial, Boletim nº 60, São Paulo, 2012. Disponível em: http://www.afipol.org.br/noticias_afipol.htm. Acessado em 15 de março de 2013.

YELLOW, P. ***A computational modification to the savings method of vehicle scheduling***. Opl Res Q 21: p. 281-283, 1970.

ZAMBONI, L. V. S. **Técnicas de roteirização de veículos aplicadas ao transporte escolar**. Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, 1997.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Resultados dos testes iniciais com o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo.....	94
APÊNDICE B - Avaliação dos Algoritmos de Melhoria e Procedimento da Seção 3.3.1.1 nas soluções do Algoritmo do Vizinho Mais Próximo.	94
APÊNDICE C - Avaliação das formas de utilização do furgão nos testes com o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo	94
APÊNDICE D - Resultados dos custos do frete dos testes iniciais da heurística <i>GRASP</i>	95
APÊNDICE E - Avaliação dos Algoritmos de Melhoria e Procedimento da Seção 3.3.1.1 nas soluções da heurística <i>GRASP</i>	95
APÊNDICE F - Avaliação das formas de utilização do furgão nos testes iniciais com a heurística <i>GRASP</i>	95
APÊNDICE G - Quantidade de cargas consolidadas nas soluções geradas pela heurística <i>GRASP</i>	96
APÊNDICE H - Resultado dos Custos do frete dos testes iniciais da heurística de <i>Clarke e Wright</i>	97
APÊNDICE I - Avaliação das formas de utilização do furgão nos testes da heurística de <i>Clarke e Wright</i>	97
APÊNDICE J - Custos do frete das soluções geradas nos experimentos iniciais da heurística de <i>Mole e Jameson</i>	98
APÊNDICE K - Avaliação dos Algoritmos de Melhoria e Filtro nas soluções da heurística de <i>Mole e Jameson</i>	98
APÊNDICE L - Avaliação das formas de utilização do furgão nos testes iniciais da heurística de <i>Mole e Jameson</i>	99

ANEXOS

ANEXO 1 - ATRASOS DE ENTREGA NOS PEDIDOS93

ANEXO 1 - ATRASOS DE ENTREGA NOS PEDIDOS

Obs.:

- Dias de atrasos de entrega nos pedidos, referente ao trabalho desenvolvido pela Empresa;
- Na primeira coluna constam os dias de atrasos sofridos pelos pedidos, na segunda coluna, quantos pedidos sofreram esse atraso.

Dias de Atraso	Pedidos com atraso
1	179
2	82
3	91
4	54
5	47
6	26
7	27
8	15
9	11
10	8
11	5
12	5
13	8
14	5
15	4
16	5
17	4
18	4
20	4
21	1
22	2
24	1
25	1
27	1
28	2
31	1
50	1
60	1
Total de Pedidos com atraso	595

APÊNDICE A - Resultados dos testes iniciais com o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo

Furgão	Alg. Mel.	Procedimento Seção 3.3.1.1	Custos do Frete	Dias de Atrasos de Entrega
Alternado	-	-	672.028,87	911
	-	Sim	642.165,16	850
	Sim	-	637.546,90	635
	Sim	Sim	619.135,15	633
Diário	-	-	672.028,87	911
	-	Sim	642.165,16	850
	Sim	-	637.546,90	635
	Sim	Sim	619.135,15	633
Semanal	-	-	659.318,73	834
	-	Sim	631.020,22	878
	Sim	-	628.484,49	652
	Sim	Sim	609.372,18	622

APÊNDICE B - Avaliação dos Algoritmos de Melhoria e Procedimento da Seção 3.3.1.1 nas soluções do Algoritmo do Vizinho Mais Próximo.

Obs.: Percentuais de redução nos custos do frete nas soluções geradas com o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo com utilização dos Algoritmos de Melhoria e do Procedimento definido na seção 3.3.1.1, em relação à solução gerada somente com a heurística.

Furgão	Alg. Mel.	Procedimento seção 3.3.1.1	Percentual de redução, Furgão:			Média
			Alternado	Diário	Semanal	
Alternado	-	Sim	4,44%	4,44%	4,29%	4,39%
	Sim	-	5,13%	5,13%	4,68%	4,98%
	Sim	Sim	7,87%	7,87%	7,58%	7,77%

APÊNDICE C - Avaliação das formas de utilização do furgão nos testes com o Algoritmo do Vizinho Mais Próximo

Obs.: Percentuais de redução nos custos do frete nas soluções, relacionados às formas de utilização do furgão.

Alg. Mel.	Procedimento Seção 3.3.1.1	Formas de utilização do furgão	
		Diário - Alternado	Diário - Semanal
-	-	0,00%	1,89%
-	Sim	0,00%	1,74%
Sim	-	0,00%	1,42%
Sim	Sim	0,00%	1,58%
Média		0,00%	1,66%

APÊNDICE D - Resultados dos custos do frete dos testes iniciais da heurística GRASP

Furgão	Alg. Mel.	Procedimento Seção 3.3.1.1	Iterações				
			5	10	15	20	25
Diário	-	-	723.911,98	709.560,47	692.529,57	723.139,38	727.758,26
	-	Sim	693.214,33	680.230,86	673.363,91	673.653,42	663.703,65
	Sim	-	664.750,96	657.822,64	656.205,65	665.740,72	656.851,72
	Sim	Sim	654.420,31	650.111,85	648.966,54	631.456,25	621.048,27
Alternado	-	-	723.911,98	709.560,47	692.529,57	723.139,38	727.758,26
	-	Sim	693.214,33	680.230,86	673.363,91	673.653,42	663.703,65
	Sim	-	664.750,96	657.822,64	656.205,65	665.740,72	656.851,72
	Sim	Sim	654.420,31	650.111,85	648.966,54	606.054,94	621.048,27
Semanal	-	-	717.480,01	711.471,64	708.801,23	703.601,19	705.410,90
	-	Sim	714.430,95	691.052,22	688.189,24	685.868,97	687.121,02
	Sim	-	655.371,78	654.248,31	658.079,66	655.227,73	637.327,80
	Sim	Sim	640.634,20	643.205,68	640.546,52	618.908,70	627.011,94

APÊNDICE E - Avaliação dos Algoritmos de Melhoria e Procedimento da Seção 3.3.1.1 nas soluções da heurística GRASP

Obs.: Percentuais de redução nos custos do frete com utilização dos algoritmos de melhoria e procedimento da seção 3.3.1.1 em relação à solução original

Furgão	Alg. Mel.	Procedimento seção 3.3.1.1	Iterações					Média
			5	10	15	20	25	
Diário	-	Sim	4,24%	4,13%	2,77%	6,84%	8,80%	5,36%
	Sim	-	8,17%	7,29%	5,25%	7,94%	9,74%	7,68%
	Sim	Sim	9,60%	8,38%	6,29%	12,68%	14,66%	10,32%
Alternado	-	Sim	4,24%	4,13%	2,77%	6,84%	8,80%	5,36%
	Sim	-	8,17%	7,29%	5,25%	7,94%	9,74%	7,68%
	Sim	Sim	9,60%	8,38%	6,29%	16,19%	14,66%	11,02%
Semanal	-	Sim	0,42%	2,87%	2,91%	2,52%	2,59%	2,26%
	Sim	-	8,66%	8,04%	7,16%	6,88%	9,65%	8,08%
	Sim	Sim	10,71%	9,60%	9,63%	12,04%	11,11%	10,62%
Média			4,32%	7,81%	10,65%			

APÊNDICE F - Avaliação das formas de utilização do furgão nos testes iniciais com a heurística GRASP

Obs.: Percentuais de redução nos custos do frete entre as soluções, relacionados às formas de utilização do furgão.

Comparação entre as formas de utilização do furgão:	Iterações					Média
	5	10	15	20	25	
Alternada em relação à Diária	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Semanal em relação à Diária	2,11%	1,06%	1,30%	1,99%	0,95%	1,48%

APÊNDICE G - Quantidade de cargas consolidadas nas soluções geradas pela heurística GRASP

Quantidade de cargas e percentuais de redução para os veículos caminhão								
Iterações	Lista Restrita de Candidatas com n :							
	2	%	3	%	4	%	5	%
5	111	5,13%	111	5,13%	112	4,27%	112	4,27%
10	112	4,27%	111	5,13%	111	5,13%	110	5,98%
15	112	4,27%	113	3,42%	112	4,27%	111	5,13%
20	111	5,13%	114	2,56%	112	4,27%	112	4,27%
25	111	5,13%	112	4,27%	113	3,42%	114	2,56%
30	111	5,13%	112	4,27%	111	5,13%	113	3,42%
40	114	2,56%	110	5,98%	113	3,42%	112	4,27%
50	114	2,56%	109	6,84%	114	2,56%	113	3,42%
75	115	1,71%	114	2,56%	114	2,56%	113	3,42%
100	113	3,42%	110	5,98%	115	1,71%	111	5,13%
150	114	2,56%	112	4,27%	112	4,27%	112	4,27%
200	115	1,71%	111	5,13%	116	0,85%	110	5,98%

Quantidade de cargas e percentuais de redução para o veículo Furgão								
Iterações	Lista Restrita de Candidatas com n :							
	2	%	3	%	4	%	5	%
5	1	96,97%	3	90,91%	5	84,85%	8	75,76%
10	8	75,76%	2	93,94%	10	69,70%	7	78,79%
15	2	93,94%	2	93,94%	3	90,91%	8	75,76%
20	5	84,85%	3	90,91%	2	93,94%	6	81,82%
25	6	81,82%	1	96,97%	7	78,79%	5	84,85%
30	11	66,67%	1	96,97%	8	75,76%	8	75,76%
40	3	90,91%	5	84,85%	6	81,82%	4	87,88%
50	2	93,94%	11	66,67%	3	90,91%	5	84,85%
75	5	84,85%	4	87,88%	4	87,88%	8	75,76%
100	3	90,91%	10	69,70%	2	93,94%	10	69,70%
150	2	93,94%	2	93,94%	1	96,97%	9	72,73%
200	1	96,97%	3	90,91%	2	93,94%	8	75,76%

APÊNDICE H - Resultado dos Custos do frete dos testes iniciais da heurística de *Clarke e Wright*

Furgão	Alg. Mel	Parâmetro Modelador:									
		0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
Alternado	-	840.924,23	730.321,16	714.944,30	682.587,60	691.494,64	673.947,13	650.026,17	658.610,20	637.188,94	620.116,72
	Sim	773.446,23	723.178,76	674.174,04	673.644,56	689.550,07	655.791,92	645.299,40	623.718,81	628.493,58	615.631,42
Diário	-	840.924,23	730.321,16	714.944,30	682.587,60	691.494,64	673.947,13	650.026,17	658.610,20	637.188,94	620.116,72
	Sim	773.446,23	723.178,76	674.174,04	673.644,56	689.550,07	655.791,92	645.299,40	623.718,81	628.493,58	598.264,78
Semanal	-	820.420,11	719.071,10	668.679,84	673.579,67	660.586,80	666.399,97	636.507,00	624.295,65	629.361,93	615.631,42
	Sim	770.422,25	715.621,84	659.467,17	654.614,39	655.300,18	644.730,45	624.992,87	609.666,45	611.279,14	602.235,09

APÊNDICE I - Avaliação das formas de utilização do furgão nos testes da heurística de *Clarke e Wright*

Obs.: Percentuais de redução nos custos do frete entre as soluções, relacionados às formas de utilização do furgão.

Comparação entre as formas de utilização do furgão:	Parâmetro Modelador:										Média
	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	
Alternada em relação à Diária	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Semanal em relação à Diária	0,39%	1,04%	2,18%	2,82%	4,97%	1,69%	3,15%	2,25%	2,74%	2,82%	2,41%

Furgão	Filtro	Alg. Mel.	Parâmetros ($\lambda - \mu$)									Média		
			1,1 - 0,9	1,2 - 0,8	1,3 - 0,7	1,4 - 0,6	1,5 - 0,5	1,6 - 0,4	1,7 - 0,3	1,8 - 0,2	1,9 - 0,1			
Alternado	-	Sim	3,28%	5,08%	5,69%	4,28%	6,63%	5,29%	3,81%	7,26%	8,78%	5,57%	0,56%	7,01%
	Sim	-	0,19%	0,35%	0,48%	0,52%	0,18%	1,14%	0,70%	0,24%	1,23%			
	Sim	Sim	9,54%	8,02%	5,52%	4,61%	6,38%	6,82%	6,42%	7,83%	7,91%			
Diário	-	Sim	3,28%	5,08%	5,69%	4,28%	6,63%	5,29%	3,81%	7,26%	8,78%	5,57%	0,56%	7,01%
	Sim	-	0,19%	0,35%	0,48%	0,52%	0,18%	1,14%	0,70%	0,24%	1,23%			
	Sim	Sim	9,54%	8,02%	5,52%	4,61%	6,38%	6,82%	6,42%	7,83%	7,91%			
Semanal	-	Sim	6,62%	6,97%	8,64%	3,23%	1,85%	3,84%	3,66%	3,54%	4,30%	4,74%	1,28%	6,36%
	Sim	-	0,39%	0,97%	0,34%	1,14%	0,46%	0,68%	0,86%	2,79%	3,86%			
	Sim	Sim	13,25%	7,85%	8,16%	4,64%	3,46%	4,19%	4,68%	5,43%	5,53%			
Média												5,29%	0,80%	6,79%

APÊNDICE L - Avaliação das formas de utilização do furgão nos testes iniciais da heurística de *Mole* e *Jameson*

Obs.: Percentuais de redução nos custos do frete entre as soluções, relacionados às formas de utilização do furgão.

PERCENTUAL DE REDUÇÃO DAS SOLUÇÕES DA HEURÍSTICA DE <i>MOLE</i> E <i>JAMESON</i> , COM RELAÇÃO ÀS FORMAS DE UTILIZAÇÃO DO FURGÃO.										
Comparações	Parâmetros ($\lambda - \mu$)									Média
	1,1 - 0,9	1,2 - 0,8	1,3 - 0,7	1,4 - 0,6	1,5 - 0,5	1,6 - 0,4	1,7 - 0,3	1,8 - 0,2	1,9 - 0,1	
Furgão Alternado em relação ao Diário	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Furgão Semanal em relação ao Diário	2,22%	1,86%	2,01%	2,16%	0,87%	0,53%	1,53%	2,61%	1,94%	1,75%